

ambiente rischio comunicazione

Quadrimestrale di analisi e monitoraggio ambientale

numero 5
febbraio 2013

CHE SUCCIDE AI CAMPI FLEGREI?

In questo numero:

CHE SUCCIDE AI CAMPI FLEGREI?

Prefazione

Edoardo Cosenza

Editoriale

Ugo Leone

L'attività recente dei Campi Flegrei

Marcello Martini

Cosa sta avvenendo al di sotto dei Campi Flegrei

Lucia Civetta, Roberto Moretti, Giovanni Orsi, Ilenia Arienzo, Massimo D'Antonio

Struttura e storia dei Campi Flegrei

Giovanni Orsi, Aldo Zollo

Cronache di un'eruzione: la nascita di Monte Nuovo nel 1538

Roberto Scandone, Lisetta Giacomelli

Il bradisismo del 1970

Paolo Gasparini

Il bradisismo degli anni Ottanta

Giuseppe Luongo

La comunicazione nei giorni del bradisismo

Franco Mancusi

Stima della probabilità di eruzioni

Jacopo Selva, Laura Sandri, Warner Marzocchi, Paolo Papale

Terremoti in aree vulcaniche: i Campi Flegrei

Paolo Capuano

Le perforazioni profonde a scopo scientifico: esiste un rischio "sismico"?

Giuseppe De Natale, Paolo Gasparini

Il paradiso e l'inferno

Pietro Greco

Considerazioni conclusive

Franco Gabrielli

I numeri precedenti:

RISCHIO SISMICO

GESTIONE DEI RIFIUTI URBANI

DISSESTO IDROGEOLOGICO

DECIDERE NELL'INCERTEZZA

Tutti i numeri di *Ambiente Rischio Comunicazione* possono essere scaricati gratuitamente dai siti www.amracenter.com e www.doppiavoce.it.

Prima di tutto

Paolo Gasparini, Ugo Leone

Ancora una volta siamo costretti ad anteporre agli articoli del numero in uscita di *Ambiente Rischio Comunicazione* un *Prima di tutto*. Ci costringe un evento: la distruzione, per mano di delinquenti incendiari, che a Napoli hanno incenerito il centro museale della Città della Scienza.

In poche ore le fiamme hanno violentemente cancellato oltre venti anni di appassionato lavoro durante i quali in città è cresciuto e si è affermato uno dei più importanti Science Center d'Europa. Sede dell'annuale appuntamento con *Futuro remoto*; punto di incontro, nelle varie attività museali e di laboratorio, di centinaia di migliaia di visitatori soprattutto scolari di ogni ordine e grado; luogo di costruzione di cultura della conoscenza. Cultura che solo il rozzo approccio di parte della politica a queste tematiche considera di minima o nulla importanza in quanto incapace di “dar da mangiare”. Per anni, nonostante i problemi dovuti alla mancata erogazione da parte dello Stato di finanziamenti già decisi, la Città della Scienza ha continuato a diffondere, a bambini e adulti, il metodo e il pensiero della scienza, la più grande avventura umana e il riferi-

mento più credibile per programmare il nostro futuro.

Tutto ciò in un'area ex industriale – Bagnoli – le cui strutture di archeologia industriale sono state sapientemente recuperate e riutilizzate.

E tutto in quei Campi Flegrei la cui potenziale pericolosità è oggetto di questo numero della rivista. Una coincidenza che ancora una volta dimostra che la specie umana deve guardarsi più da se stessa che dalla natura. Diceva Einstein che la Natura può essere subdola, ma non maliziosa. L'ignoranza, l'avidità e l'arroganza portano invece l'uomo a essere subdolo e malizioso.

Un segnale di conforto viene dalla rapida e decisa reazione con la quale la gente, le autorità nazionali, locali ed europee ed il mondo scientifico internazionale hanno affiancato tutti coloro che sono impegnati nella Città della Scienza per avviare una ricostruzione immediata del suo Centro Museale, che non può non avvenire nello stesso posto in cui a pieno titolo si trovava, anche perché non passi il pericoloso messaggio che per rimuovere o spostare in altro luogo qualcosa che dà fastidio, basti mandarla in fiamme.

Sommario

**numero 5
febbraio 2013**

CHE SUCCIDE AI CAMPI FLEGREI?

Prefazione <i>Edoardo Cosenza</i>	2
Editoriale <i>Ugo Leone</i>	4
L'attività recente dei Campi Flegrei <i>Marcello Martini</i>	7
Cosa sta avvenendo al di sotto dei Campi Flegrei <i>Lucia Civetta, Roberto Moretti, Giovanni Orsi, Ilenia Arienzo, Massimo D'Antonio</i>	13
Struttura e storia dei Campi Flegrei <i>Giovanni Orsi, Aldo Zollo</i>	18
Cronache di un'eruzione: la nascita di Monte Nuovo nel 1538 <i>Roberto Scandone, Lisetta Giacomelli</i>	25
Il bradisismo del 1970 <i>Paolo Gasparini</i>	31
Il bradisismo degli anni Ottanta <i>Giuseppe Luongo</i>	36
La comunicazione nei giorni del bradisismo <i>Franco Mancusi</i>	46
Stima della probabilità di eruzioni <i>Jacopo Selva, Laura Sandri, Warner Marzocchi, Paolo Papale</i>	49
Terremoti in aree vulcaniche: i Campi Flegrei <i>Paolo Capuano</i>	58
Le perforazioni profonde a scopo scientifico: esiste un rischio "sismico"? <i>Giuseppe De Natale, Paolo Gasparini</i>	62
Il paradiso e l'inferno <i>Pietro Greco</i>	67
Considerazioni conclusive <i>Franco Gabrielli</i>	70
Notiziario AMRA	72
Gli autori	74

Prefazione

Edoardo Cosenza

Vedere la nostra terra, la Campania, dal mare, dalle colline, dall'aereo è spettacolare. Con le sue coste frastagliate, le straordinarie isole, i porti naturali, offre un meraviglioso spettacolo della natura. È senz'altro un paradiso, la Campania Felix di tanta letteratura. Ma noi sappiamo bene che è un paradiso che al di sotto ha l'inferno, anzi è uno dei posti del mondo dove l'inferno è più vicino al paradiso. E non credo sia un caso che, nella letteratura classica, la discesa verso gli inferi parta proprio da posti della Campania. La straordinaria natura in superficie è in buona parte dovuta alla natura vulcanica che vi è al di sotto. Con i suoi tre vulcani attivi, il Vesuvio, i Campi Flegrei ed Ischia, è una delle regioni più complesse al Mondo. Le tre aree vulcaniche usufruiscono della presenza di acqua termale, di fanghi terapeutici, di energia geotermica, ma devono convivere con la presenza di una possibile eruzione vulcanica.

Le azioni di Protezione Civile sono dunque di fondamentale importanza. La Regione Campania sa bene di poter contare sull'Osservatorio Vesuviano, una struttura tecnico-scientifica di assoluto valore internazionale, con una rete di monitoraggio accurata e perfettamente funzionante. I contatti sono frequentis-

simi e proficui. E la Regione sa di poter contare su una comunità scientifica molto presente, aggiornata, con prestigio internazionale. E poi Amra che mette in rete molte competenze trasversali e cura importanti progetti scientifici ed applicativi.

Questa numero di *Ambiente Rischio Comunicazione* viene al momento giusto, e non poteva essere che così. Il momento è particolare perché, come viene ben descritto negli articoli, le deformazioni del suolo, l'attività sismica e le emissioni di gas registrate ai Campi Flegrei hanno suggerito alla Protezione Civile Nazionale di passare dal livello di Base a livello di Attenzione del Piano di emergenza. In parallelo, proprio in questi giorni gli studiosi incaricati hanno consegnato alla Protezione Civile il nuovo scenario di emergenza. Lo scenario, una volta adottato dal DPC e dalla Regione Campania, costituirà la base per i nuovi piani di emergenza.

A livello nazionale, con tutti i risvolti di competenza governativa, come i gemellaggi con altre regioni per la possibile evacuazione, poi a scendere i piani di dettaglio comunali, la Regione è l'anello di congiunzione fra DPC e Comuni. E deve poi programmare le grandi azioni infrastrutturali. Importanti sforzi economici si stanno facendo per migliorare il sistema stradale.

Sappiamo bene che gli scenari eruttivi dei Campi Flegrei sono molto complessi, a causa della non prevedibilità della posizione della bocca eruttiva. Non è l'unica differenza, in negativo, rispetto al Vesuvio. Vi è anche la barriera costituita dal mare rispetto all'evacuazione: per il Vesuvio si sta lavorando intensamente per migliorare la viabilità circolare intorno al cono, intensificando le azioni per terminare la terza corsia dell'autostrada Napoli-Salerno nel tratto fino a Scafati, e per raddoppiare le carreggiate sull'intera tratta della statale 268 del Vesuvio. Inoltre la Regione ha appena finanziato, con 54 milioni di euro di fondi europei, la saldatura dei due citati tratti stradali con un nuovo svincolo della statale 268 direttamente sull'autostrada ad Angri, in modo da avere un anello a grande scorrimento intorno al Vesuvio. Invece per i Campi Flegrei si possono solo migliorare gli assi stradali

di uscita, ma non avere una mobilità circolare. Dunque il problema dei piani di emergenza è particolarmente complesso e bisognerà lavorare intensamente nei prossimi mesi. Per adesso, d'accordo con il DPC e l'Osservatorio Vesuviano, si è intensificata l'attività di formazione dei tecnici locali. Con moduli didattici generali e specifici, e con importanti visite e sopralluoghi sul campo.

In tutte le attività le azioni della comunità scientifica sono fondamentali, e dunque davvero ringrazio Amra, i curatori Lucia Civetta e Paolo Gasparini e tutti gli autori di questo prezioso numero della rivista, contemporaneamente di grande valore scientifico e divulgativo e che sicuramente costituirà un riferimento fondamentale per tutti coloro che si vorranno o si dovranno interessare dei Campi Flegrei.

Editoriale

Ugo Leone

Che succede nei Campi Flegrei? La risposta paradossalmente semplice è che circolano informazioni. E, come spesso accade in queste circostanze, dopo che la scarsità di notizie ha indotto a dimenticare la realtà, quando le notizie ricominciano a circolare l'opinione pubblica si allarma.

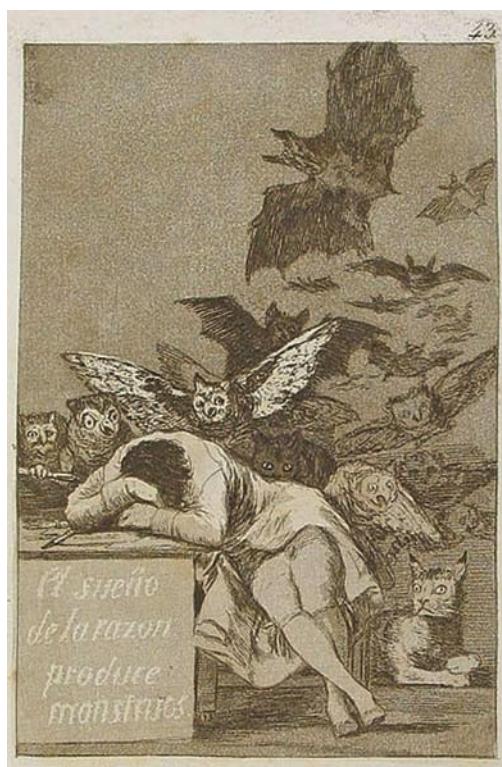
Ricordo che quando nel 1995 quasi in casuale contemporaneità fu istituito il Parco nazionale del Vesuvio e formalizzato il Piano di emergenza della Protezione Civile per l'area vesuviana, la professoressa Lucia Civetta in qualità di direttore dell'Osservatorio Vesuviano ed io come presidente del Parco, fummo impegnati in più occasioni ad illustrare insieme le due "novità".

L'immediata risposta da parte di chi aveva dimenticato di vivere alle falde di un pericoloso vulcano che solo 50 anni prima (nel 1944) aveva provocato danni materiali e vittime fu una domanda: «Ma sta succedendo qualcosa?».

Era la dimostrazione, ennesima, dell'importanza dell'informazione – puntuale e corretta – e del sonno al quale inducono il silenzio e l'ignoranza indotta. Ed è l'ulteriore dimostrazione che, ricordando Goya, «il sonno della ragione genera mostri» e, aggiungerei, li genera soprattutto “al risveglio”.

Così è stato per il Vesuvio e rischia di esserlo per i Campi Flegrei.

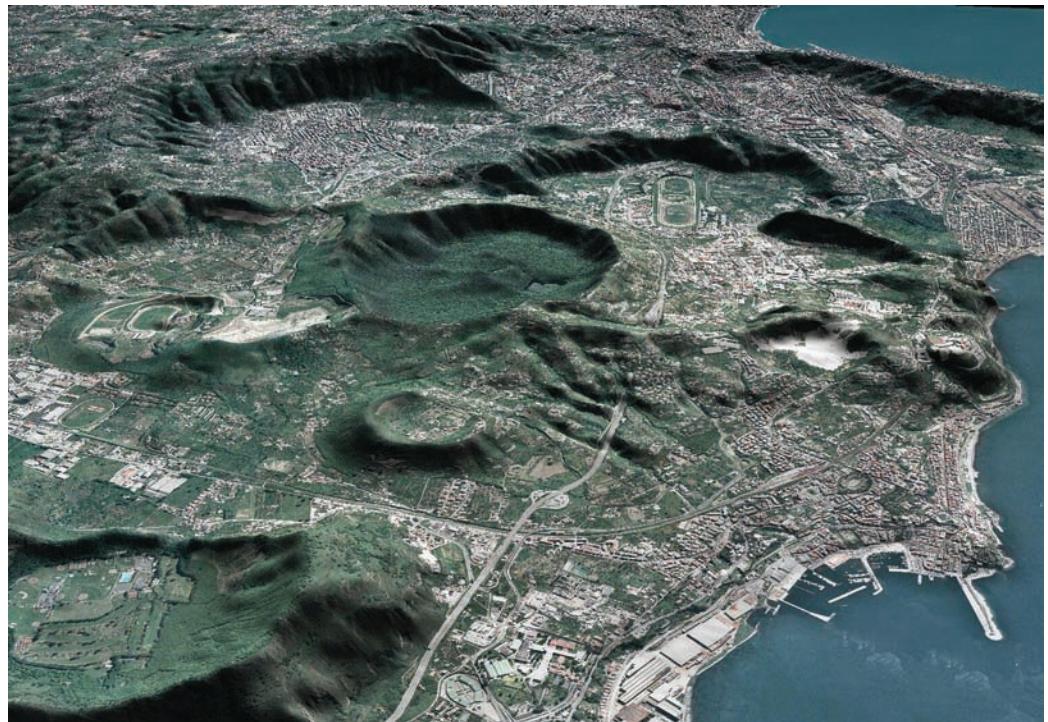
Perciò in questo numero di ARC proviamo a rispondere alla domanda che



proponevo all'inizio: Che succede nei Campi Flegrei? Ce lo dicono con la dovuta cognizione di causa tutti gli autori di questo numero, ci ricordano che cosa e in quale contesto naturale è avvenuto in passato e si soffermano sui modi in cui è stata gestita e può essere gestita l'emergenza.

La risposta al quesito si basa innanzitutto sul ricordo dei principali momenti storici di riferimento: dall'eruzione del 1538 alle crisi bradisismiche degli

Campi Flegrei:
veduta aerea.



anni Settanta e Ottanta. Facendo tesoro della conoscenza di questi eventi e dei segnali che si stanno registrando è possibile dire che cosa c'è di nuovo e quali scenari sono prospettabili per il futuro.

Ma i Campi Flegrei hanno anche, per certi versi soprattutto, un passato che è utilmente riassumibile nell'efficace sintesi di Amedeo Maiuri. Il famoso archeologo ha così definito i Campi Flegrei: «Una moltitudine di crateri e tutti i fenomeni più singolari e diversi dell'idrologia e del vulcanesimo, fonti minerali e termali, ribollenti dal suolo o dalle profondità del mare, fumarole e solfatara con caldissime emanazioni gassose, vulcani spenti e laghi scaturiti dalle voragini di crateri inabissati, boscaglie secolari che ammantano le pendici di altri crateri, lento sprofondare della terra e violento ed improvviso erompere di vulcani, rendono ragione della denominazione che gli antichi dettero a tutta la regione a ponente di

Napoli, comprese le isole di Nisida, di Procida e di Ischia: "Campi Flegrei" si dissero dai primi abitatori ellenici, che vedevano ancora nel V secolo l'Epomeo solcato dalle vampe sanguigne delle lave, perché apparivano *fiammeggianti* e come combusti dal fuoco. Ed accanto alla più lussureggianti vegetazione ed agli aspetti più sereni e lieti della natura, qual è tutto l'amenissimo lido di Pozzuoli e di Baia, il cratere ribollente della Solfatara, la plumbea pesantezza delle acque del lago d'Averno, le caverne e le spelonche sacre al culto dell'invisibile, agli spiriti ed alle voci del mistero».

Nel 1971, in una *Guida alla natura d'Italia*, Franco Tassi, a proposito dei Campi Flegrei, scriveva che «una regione di eccezionale importanza naturalistica, unica al mondo e ricchissima dei fenomeni e delle attrattive più diverse come i Campi Flegrei, sarebbe stata in un altro Paese conservata civilmente nel modo più rigoroso» al contrario «nel prezio-

so comprensorio è avvenuto invece il più barbaro scempio che l'uomo abbia commesso».

Questo scempio, provocato soprattutto dall'urbanizzazione incontrollata e disordinata che ha determinato lo sviluppo di questi territori, dagli anni Cinquanta ad oggi, a scapito di significativi spazi verdi urbani ha “consentito” alla popolazione dei quattro comuni dell'area (Bacoli, Monte di Procida, Pozzuoli e Quarto) di passare da 71.216 residenti nel 1951 a 159.201 al censimento del 2011. In questo modo, e per il modo in cui l'urbanizzazione si è realizzata, qui come in area vesuviana, si è non solo negativamente impattato su quella «regione di eccezionale importanza

naturalistica» e su quell'eccezionale insieme di prodotti della cultura materiale accumulatisi in tremila anni, ma si è anche enormemente aumentata la vulnerabilità dell'area, cioè l'esposizione al rischio della popolazione.

Infine, per chiudere e rifacendomi all'osservazione iniziale, vi è un'altra singolare, casuale, coincidenza: la rivista *Internazionale* nel numero 986 dell'8 febbraio ha dedicato la settimanale rubrica *Il pianeta visto dallo spazio* proprio ai Campi Flegrei con un'immagine del 7 luglio 2012.

Non occorre far lavorare troppo la fantasia per distinguere il verde dal costruito.

L'attività recente dei Campi Flegrei

Marcello Martini

Dal 2000 l'Osservatorio Vesuviano controlla in modo continuo la deformazione del suolo dell'area flegrea. Il livello di allerta per i Campi Flegrei dal livello "base" è passato a quello di "attenzione" con una maggiore frequenza nelle comunicazioni trasmesse al Dipartimento della Protezione Civile. Ma i fenomeni sono di un'entità nettamente inferiore a quanto rilevato nel corso delle precedenti crisi bradisismiche. E non si hanno elementi per poter prevedere una evoluzione a breve temine.

Secondo la scala di quattro livelli definita dal "Piano di Emergenza dell'Area Flegrea" del 2001, il livello di allerta per i Campi Flegrei dal livello di "base" è passato da alcuni mesi a quello di "attenzione". Tale livello è stato adottato dal Dipartimento della Protezione Civile dopo aver consultato la Commissione Grandi Rischi, a seguito dei parametri rilevati nell'area flegrea dal Centro di Competenza dell'INGV per tale distretto vulcanico, ovvero l'Osservatorio Vesuviano. L'Osservatorio Vesuviano segnala alla Protezione Civile in modo sistematico le informazioni ricavate dalle attività di monitoraggio del Vesuvio, dei Campi Flegrei ed Ischia, con bollettini periodici e, in caso di fenomeni particolari, anche con comunicati immediati.

Cos'è cambiato ai Campi Flegrei? Di seguito viene riportata una sintesi di quanto rilevato dall'Osservatorio Vesuviano, e vengono confrontati i dati attuali con le osservazioni relative all'attività dell'area negli ultimi anni, per i quali disponiamo di dati confrontabili. È noto che l'ultima attività dei Campi Flegrei che ha destato un livello "più che di attenzione" risale alla crisi bradisismica del 1982-1985 (Figura 1).

Evidenziato già nel gennaio 1982 a seguito di una campagna di livellazione di precisione del suolo, il fenomeno di sollevamento del suolo proseguì nel corso dei due anni successivi e terminò nel gennaio 1985, con un innalzamento

totale di 1,79 m del caposaldo dove la variazione misurata era stata maggiore. Durante il processo la velocità massima di sollevamento, rilevata nell'ottobre del 1983, fu di circa 14,5 cm/mese. Il sollevamento fu accompagnato da intensi sciami sismici, con due eventi di Magnitudo di poco superiore a 4,0. Quello avvenuto il 4 ottobre 1983 fu oggetto anche di un rilievo macrosismico, con una stima dell'intensità massima, pari al VII grado della scala MKS, rilevata a Pozzuoli (Marturano et al., 1988). Includendo anche la precedente crisi bradisismica, avvenuta tra il 1968 ed il 1972, all'inizio del 1985 il suolo si era innalzato complessivamente di circa 3,34 m.

Terminata la crisi bradisismica degli anni Ottanta, l'attività successiva fece registrare una generale ripresa della subsidienza dell'area, con un abbassamento complessivo rilevato nel novembre 2004 di circa 94 cm. La misura è riferita al punto di sollevamento massimo misurato nel 1985, sempre ricontrattato con successive campagne di livellazione. La velocità media di subsidienza, pari a circa -4,7 cm/anno, fu più elevata nella fase iniziale dell'abbassamento, con un valore di circa -19 cm/anno. È da notare che questi valori di subsidienza sono più elevati sia rispetto a quanto rilevato strumentalmente nei decenni precedenti, sia rispetto ai valori medi riferiti ai secoli passati, valutati con metodi indiretti. La lenta subsidienza, con una velocità oscillante dell'ordine di

qualche centimetro l'anno, è stata una caratteristica persistente dell'area, e per questo è da considerarsi come uno degli indici dello stato di allerta di "base" dei Campi Flegrei.

Dal 1985 al 2004, durante la subsidenza, si verificarono anche tre brevi episodi di sollevamento, nel 1989, nel 1994 e nel 2000, tutti inferiori ai 10 cm. Analogamente a quanto avvenuto nel 1982, dopo una fase iniziale a questi sollevamenti seguirono sempre sciami sismici, anche se di bassa Magnitudo (Figura 3).

L'istituzione della rete di livellazione di precisione, realizzata inizialmente dall'IGM nel 1905 collegando Napoli con Pozzuoli, e successivamente ampliata dall'Osservatorio Vesuviano, ha reso le variazioni altimetriche il primo tra i parametri utili al monitoraggio vulcanico e ha permesso che esse venissero rilevate strumentalmente e ripetutamente. È stato così possibile ricostruire le variazioni di quota del suolo, con un dettaglio crescente nel tempo, anche prima del 1968 (Figura 1). Si è evidenziato che tra il 1905 ed il 1945 l'area è stata caratterizzata da un continuo abbassamento, con una velocità media di circa -2,5 mm/anno. La subsidenza accumulata in tale

periodo è stata di circa un metro, misurata al caposaldo di massima deformazione, prossimo al Serapeo, area in cui sono state riscontrate le variazioni maggiori anche nelle epoche successive. Mediante questi rilievi realizzati con una certa periodicità, tra il 1945 ed il 1953 è stata evidenziata anche una prima inversione della subsidenza, con un sollevamento relativo superiore a 0,5 m (Del Gaudio et al., 2010).

Dal 2000, grazie alla realizzazione di una rete fissa di stazioni GPS e alla centralizzazione automatica dei suoi dati, pur proseguendo anche nelle campagne periodiche di livellazione, l'Osservatorio Vesuviano ha controllato in modo continuo la deformazione del suolo dell'area. I dati della rete GPS mostrano che a partire dalla seconda metà del 2005, dopo un breve periodo di assenza di movimenti compreso tra il 2004 ed il 2005, è iniziata ed è tutt'ora in corso una nuova fase di lento sollevamento del suolo. Ad oggi il sollevamento, procedendo con una velocità variabile, è complessivamente di circa 20 cm (Figura 2). I valori maggiori di velocità, pari a circa 1,5 cm/mese e 2-3 cm/mese, sono stati registrati rispettivamente nel periodo di

Figura 1. Variazione di quota del caposaldo 25A della rete di livellazione dell'Osservatorio Vesuviano e del pavimento del Serapeo (da Del Gaudio et al., 2010; aggiornato al 2012).

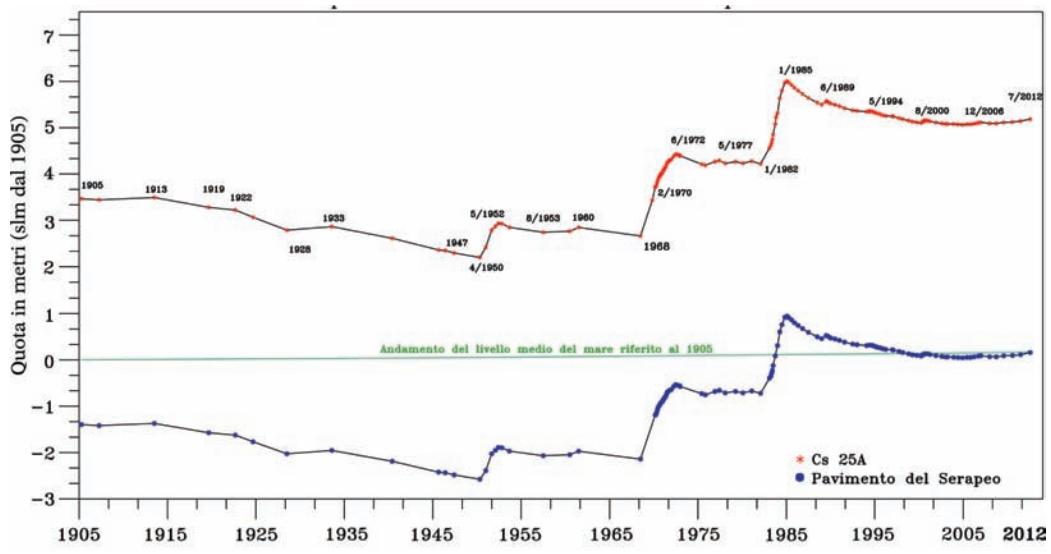
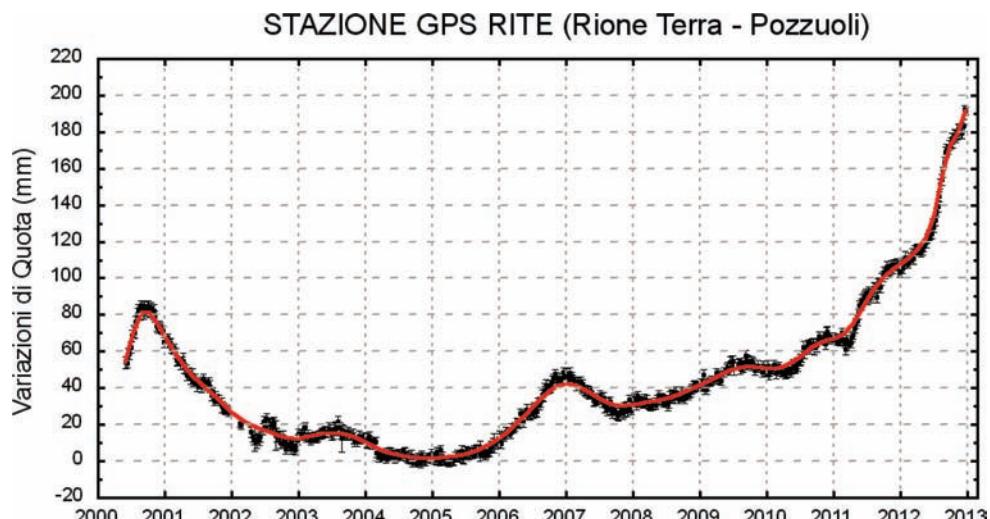


Figura 2.

Deformazioni del suolo rilevate a partire dal 2000 tramite la rete GPS (componente verticale della stazione RITE Rione Terra).



luglio-agosto 2012 e nella prima metà del dicembre 2012. Con il sollevamento è ricomparsa la sismicità locale, sempre di bassa energia ($M < 2,0$) e superficiale ($h < 4,0$ km). Solo due eventi sismici di Magnitudo prossima a 2 e facenti parte di uno sciame di oltre 200 eventi, sono stati ben avvertiti dalla popolazione il 7 settembre 2012. Contrariamente all'esperienza passata, anche nel perio-

do compreso tra il 2000 ed il 2005, ossia quando non era ancora iniziata l'attuale fase di sollevamento (Figure 2 e 3), è stata rilevata un'attività sismica, anche se molto ridotta sia come numero di eventi che livello di Magnitudo.

In generale l'attuale processo di sollevamento si distingue rispetto a quanto rilevato strumentalmente nel secolo scorso per il suo lungo perdurare, pro-

Figura 3. Sismicità a partire dal 1980. (A) Istogramma con la frequenza di accadimento (numero di eventi ogni 6 mesi, in scala logaritmica) e curva che indica il rilascio di energia deformativa associata ai terremoti (strain release). (B) Distribuzione delle Magnitudo degli eventi sismici nel corso degli anni.

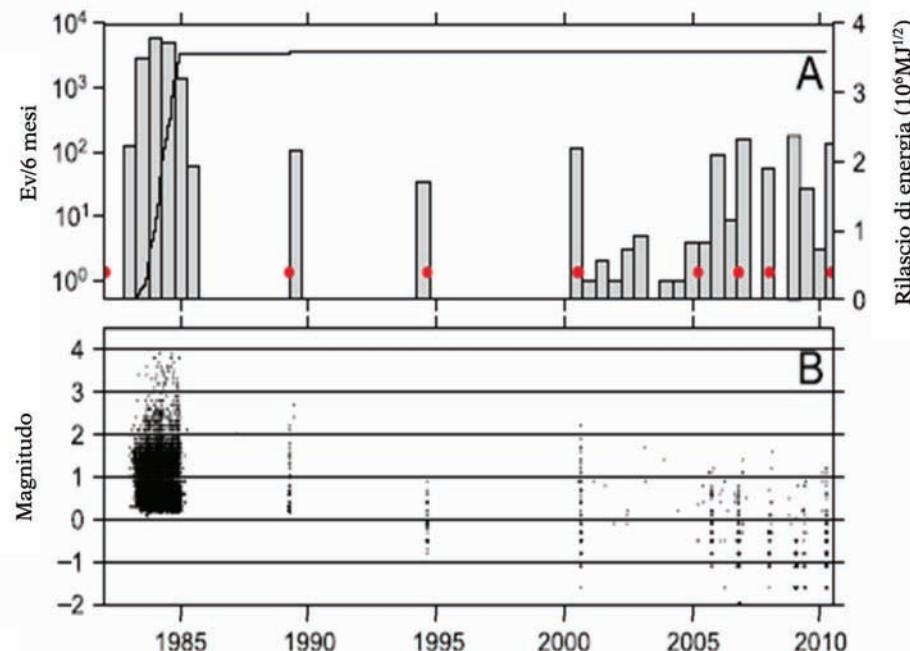
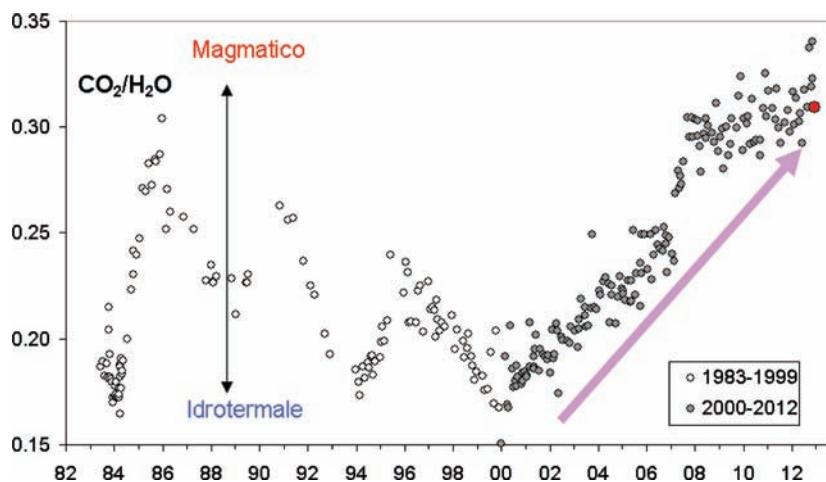


Figura 4.
Cronogramma del rapporto $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ per la fumarola BG (Bocca Grande, Solfatara). In grigio sono riportati i dati a partire dal 2000, quando è iniziato un trend d'aumento del rapporto $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$, indicativo di una crescente frazione della componente magmatica nei fluidi fumarolici. In rosso sono evidenziati i valori relativi al periodo di interesse (Unità Funzionale di Geochimica dei Fluidi INGV- Osservatorio Vesuviano).



seguendo da oltre sette anni. Unitamente alla bassa velocità di sollevamento, nettamente inferiore ai livelli della crisi bradisismica degli anni Ottanta, anche l'attività sismica si manifesta con una frequenza di accadimento bassa e distribuita nel tempo, generalmente in sequenze di piccoli sciami.

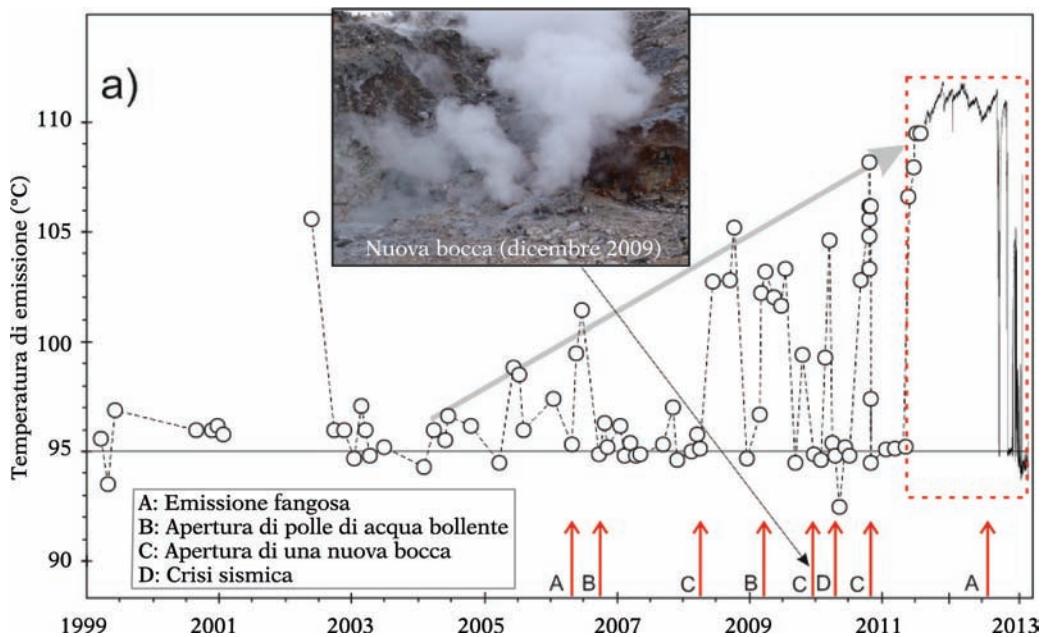
Evidenziata dalle attività di monitoraggio geochimico dell'Osservatorio Vesuviano, dal 2000 è stata rilevata un'altra importante variazione che riguarda le caratteristiche dei fluidi emessi sia dalle fumarole che dal suolo, e che interessa l'area sia interna che esterna alla Solfatara di Pozzuoli (Chiodini et al., 2010). Il monitoraggio geochimico è iniziato nel 1982-1985 con lo studio sistematico delle fumarole della Solfatara che, secondo le interpretazioni più recenti (Caliro et al., 2007), sono alimentate da una miscela di fluidi idrotermali e magmatici, questi ultimi con un alto contenuto in CO_2 (65-70% in peso). La componente magmatica delle emissioni gassose, evidenziata dal rapporto $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$, ha mostrato dei picchi che hanno sistematicamente seguito gli eventi bradisismici e che sono stati interpretati, simulandoli anche numericamente, come la manifestazione superficiale di immissioni di gas magmatici nel sistema idrotermale che alimenta le fumarole.

Dopo l'ultimo episodio di temporanea inversione del bradisismo del 2000, all'epoca ancora in una fase complessivamente discendente, la frazione di fluidi magmatici delle fumarole della Solfatara è progressivamente aumentata (Figura 4), anticipando l'altrettanto lento processo di sollevamento già descritto.

Sempre dal 2000, l'andamento del degassamento diffuso della CO_2 dal suolo, altro parametro rilevato con campagne di misura periodiche su un'area estesa che comprende la Solfatara, ha mostrato una progressiva estensione spaziale dell'emissione, che ha interessato maggiormente alcuni settori esterni alla Solfatara, tra cui l'area di Pisciarelli, localizzata sul bordo esterno del cratere della Solfatara. In particolare in questa zona, a partire dal 2006, sono evidenti anche nuovi fenomeni macroscopici, tra cui un notevole incremento dell'attività fumarolica, con un aumento dei flussi, accompagnato da un incremento delle temperature dei fluidi emessi (Figura 5).

La fenomenologia in corso è stata recentemente interpretata come dovuta, almeno in parte, a ripetuti episodi di iniezione di fluidi magmatici nel sistema idrotermale, con un aumento della frequenza di iniezione nel tempo (Chiodini

Figura 5.
Cronogramma delle temperature della fumarola di Pisciarelli, e degli eventi più significativi verificatisi in relazione all'aumento dell'attività idrotermale. La temperatura di 95° C rappresenta la temperatura di ebollizione per i fluidi fumarolici di Pisciarelli. Nella foto è riportata la nuova vigorosa fumarola sorta il 20 dicembre 2009 (dal Boll. Sorveglianza OV-INGV 2013).



et al., 2012). Questo processo produrrebbe anche un significativo aumento della pressione delle parti più superficiali del sistema, con i conseguenti fenomeni sismici e deformativi osservati. Anche se riferiti al solo periodo 2000-2007, recenti ricerche basate sull'inversione dei dati deformativi, ottenuti integrando sia misure a terra che dati derivati da interferometria satellitare InSAR, hanno identificato, a una profondità di alcuni km, una sorgente volumetrica complessa estesa spazialmente e variabile nel tempo (D'Auria et al., 2011; D'Auria et al., 2012). In particolare, è stato evidenziato che la sorgente è costituita da due parti localizzate a diversa profondità: una più superficiale, che risulta attivata con ritardo rispetto all'inizio degli episodi di sollevamento, ed una più profonda, associabile alla parte inferiore del sistema geotermico. Quest'ultima si espande nella fase iniziale del sollevamento, verosimilmente in risposta ad un input di massa e/o calore dalla sorgente magmatica sottostante, come ipotizzato anche dalle interpretazioni dei dati del monitoraggio geochimico.

La successiva espansione della sorgente superficiale, evidenziata dal processo di inversione dei dati deformativi, nell'interpretazione del fenomeno è attribuita al superamento di una soglia di pressione dei fluidi residenti nella sorgente profonda. In questa fase di trasferimento si genererebbero anche altri fenomeni, quali alcuni eventi sismici di tipo LP (Long Period), generalmente associati alla presenza o alla migrazione di fluidi in fratture, e una microsismicità molto superficiale, associabile alla graduale diffusione di fluidi nelle rocce circostanti. Tale processo abbasserebbe la resistenza delle rocce interessate da un sistema di fratture pervasivo. I fluidi, raggiungendo la superficie, darebbero origine alle variazioni geochimiche rilevate e ad alcuni fenomeni macroscopici, tra cui il notevole incremento dell'attività fumarolica osservata nell'area di Pisciarelli.

È da evidenziare che attualmente i fenomeni osservati sono di un'entità nettamente inferiore a quanto rilevato nel corso delle precedenti crisi bradisismiche. Allo stato attuale non si hanno

elementi per poter prevedere un’evoluzione a breve temine, non solo verso un’attività più intensa, confrontabile o maggiore rispetto a quanto avvenuto nel corso del bradisismo degli anni Ottanta, ma anche verso una regressione ed una ripresa della subsidenza. L’azione immediatamente richiesta all’Osservatorio Vesuviano dal passaggio al livello di “attenzione” è stata la maggiore frequenza nelle comunicazioni trasmesse al Dipartimento della Protezione Civile, e per questo i bollettini emessi sono passati da mensili a settimanali. Inoltre è richiesta un’azione di potenziamento delle attività di monitoraggio vulcanico dell’area. Per quest’ultima, che necessita anche di investimenti in termini di risorse umane ed attrezzature, è stato predisposto un piano da parte dell’INGV, che sarà sottoposto all’approvazione da parte del MIUR.

Bibliografia

Bollettini di Monitoraggio dei Vulcani, Sito web della Sezione INGV “Osservatorio Vesuviano” (www.ov.ingv.it).

Caliro S., G. Chiodini, R. Moretti, R. Avino, D. Granieri, M. Russo, J. Fiebig (2007). The origin of

the fumaroles of La Solfatara (Campi Flegrei, South Italy). *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71, 3040-3055.

Chiodini G., S. Caliro, C. Cardellini, D. Granieri, R. Avino, A. Baldini, M. Donnini, C. Minopoli (2010). Long term variations of the Campi Flegrei (Italy) volcanic system as revealed by the monitoring of hydrothermal activity. *J. Geophys. Res.*, 115, B03205.

Chiodini G., S. Caliro, P. De Martino, R. Avino, F. Gherardi (2012). Early signals of new volcanic unrest at Campi Flegrei caldera? Insights from geochemical data and physical simulations. *Geology*, doi:10.1130/G33251.1.

D’Auria L., F. Giudicepietro, I. Aquino, G. Borriello, C. Del Gaudio, D. Lo Bascio, M. Martini, G.P. Ricciardi, P. Ricciolino, C. Ricco (2011). Repeated fluid-transfer episodes as a mechanism for the recent dynamics of Campi Flegrei caldera (1989-2010). *J. Geophys. Res.*, 116, B04313, doi:10.1029/2010JB007837.

D’Auria L., F. Giudicepietro, M. Martini, R. Lanari (2012). 4D imaging of the source of ground deformation at Campi Flegrei caldera (Southern Italy). *J. Geophys. Res.*, 117, B08209.

Del Gaudio C., I. Aquino, G.P. Ricciardi, C. Ricco, R. Scandone, (2010). Unrest episodes at Campi Flegrei: A reconstruction of vertical ground movements during 1905-2009. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.05.014.

Marturano A., E. Esposito, S. Porfido, G. Luongo (1988). Il terremoto del 4 ottobre 1983 (Pozzuoli): attenuazione dell’intensità con la distanza e relazione magnitudo-intensità. Zonazione della città di Napoli. *Mem. Soc. Geol. It.*, 41, 941-948.

Cosa sta avvenendo al di sotto dei Campi Flegrei

Lucia Civetta, Roberto Moretti, Giovanni Orsi, Ilenia Arienzo, Massimo D'Antonio

È necessario che gli approcci puramente probabilistici, fondamentali nel decidere le soglie caratteristiche del fenomeno di unrest siano accompagnati da valutazioni deterministiche d'insieme delle variazioni osservate nei segnali geofisici e geochimici all'interno di un'unica ipotesi di riferimento compatibile con la dinamica degli ultimi 5.000 anni dei Campi Flegrei nota su base vulcanologica oltreché storica.

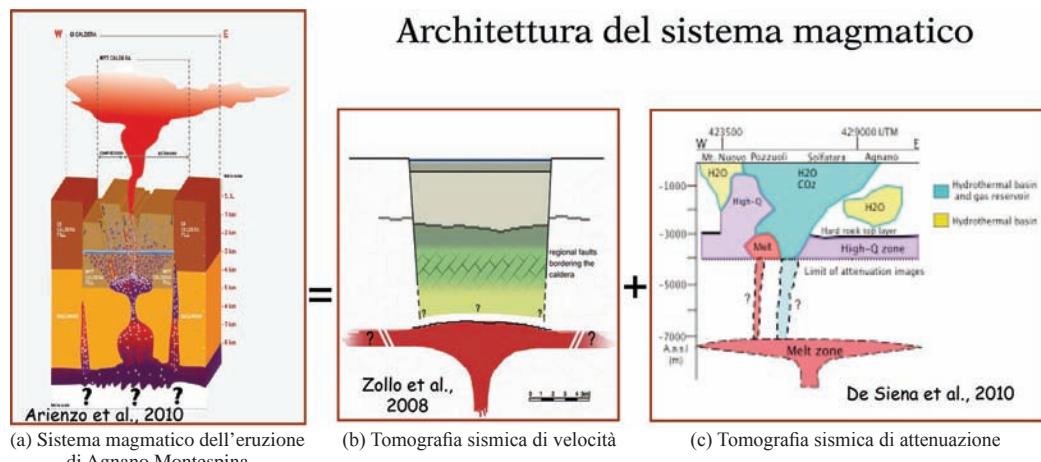
Dati geologici dei Campi Flegrei sia di superficie che di sottosuolo (quest'ultimi raccolti tramite perforazioni) e dati geofisici evidenziano che la caldera dei Campi Flegrei – un'ampia depressione prodotta da collassi correlati alle eruzioni di grande magnitudo dell'Ignimbrite Campana e del Tufo Giallo Napoletano, avvenute rispettivamente 39.000 e 15.000 anni fa – è riempita da depositi piroclastici con intercalati sedimenti marini e continentali fino ad una profondità di circa 2 km. Rocce più dense, termometamorfosate, saturate in fluidi bifase (acqua e gas) sono localizzate tra 2 e 3 km di profondità. A profondità ancora maggiori, i risultati di un'indagine basata sulla propagazione delle onde sismiche, la tomografia sismica di velocità, suggeriscono la presenza del basamento calcareo, a circa 5 km di profondità, e, a circa 8 km di profondità, di uno strato caratterizzato da una bassa velocità di propagazione delle onde sismiche, dello spessore di circa 1 km, interpretato come una zona parzialmente fusa. Esso dovrebbe corrispondere al serbatoio magmatico profondo identificato dagli studi petrologici sui prodotti delle eruzioni flegree degli ultimi 15.000 anni, localizzato a circa 8-10 km di profondità, e considerato parte del complesso sistema magmatico che ha alimentato il vulcanismo recente dei Campi Flegrei (Figura 1).

I magmi eruttati ai Campi Flegrei hanno una composizione chimica e mine-

ralogica variabile, che si riflette in una variabilità del contenuto in SiO_2 , dal 52 al 62% in peso, dei prodotti vulcanici. In accordo con i dati petrologici, negli ultimi 15.000 anni il sistema magmatico flegreo è stato caratterizzato da almeno due serbatoi localizzati a diversa profondità (Figura 1): un serbatoio profondo (8-10 km), dove magmi di composizione meno differenziata, cioè meno ricca in silice, risiedevano, cristallizzavano e degassavano, e da cui raggiungevano la superficie terrestre risalendo lungo porzioni dei sistemi di faglie e fratture a direzione NE-SO bordanti la caldera più recente dei Campi Flegrei, o risalivano a minore profondità per formare uno o più serbatoi “superficiali” (4-5 km di profondità), dove stazionavano e subivano ulteriori processi di differenziazione e di mescolamento con magmi parzialmente cristallizzati, prima di eruttare. La parte ancora attiva della caldera dei Campi Flegrei comprende, inoltre, un sistema idrotermale ben sviluppato e attivo, le cui manifestazioni superficiali sono concentrate nelle aree maggiormente interessate dal vulcanismo e dalla deformazione negli ultimi 5.000 anni. Le manifestazioni più importanti sono quelle di La Solfatara (Figura 2) e di Pisciarelli. Le perforazioni effettuate negli ultimi decenni hanno inoltre evidenziato numerosi serbatoi geotermici tra 1 e 3 km di profondità, il più profondo dei quali contiene fluidi salini ad alta temperatura (350-400°C).

Figura 1. Sketch geo-vulcanologico del sistema magmatico alimentante l'eruzione di Agnano Monte Spina (a), elaborato utilizzando i risultati delle tomografie sismiche (b, c) per definire l'architettura del sistema magmatico dei Campi Flegrei. Tale sistema può rappresentare un'utile approssimazione per ipotizzare scenari presenti e futuri in cui il magma e i suoi gas interagiscono con il sistema idrotermale.

Figura 2. La Solfatara.



L'applicazione di un'altra tecnica sismica, la tomografia sismica di attenuazione, ha evidenziato la probabile presenza di un piccolo volume di materiale parzialmente fuso (camera magmatica superficiale; Figura 1) a 3-4 km di profondità al di sotto della porzione della caldera dei Campi Flegrei che ha subito il massimo sollevamento durante il bradisismo del 1982-84, e che viene considerato da molti ricercatori il residuo del corpo magmatico che si è intruso durante quell'evento. Questa interpre-

tazione è in accordo anche con le alte temperature misurate nei pozzi geotermici, che registrano valori di circa 400° C a 3 km di profondità, e con le composizioni dei fluidi emessi negli anni Ottanta a La Solfatara e a Pisciarelli, caratterizzate da un elevato contenuto in gas magmatici. Quest'ultima caratteristica è stata spiegata con la presenza di un corpo magmatico sottostante in degassamento, che rilascia H₂O, CO₂ e gas acidi nel sistema idrotermale, la cui base è a circa 2,5 km di profondità,



a condizioni di P e T vicine al punto critico dell'acqua. I fluidi magmatici, mescolandosi con le acque meteoriche che in profondità sono sature di CO₂ e costituiscono la vera e propria componente idrotermale, generano una *plume* ascendente di gas caldi che in risalita condensa vapore. Tali condensati contribuiscono fortemente alla circolazione idrica sotterranea, dando origine ad una falda che in parte emerge nella piana di Agnano. Bisogna sottolineare che gli importanti flussi di CO₂ misurati nell'area (in media 1.500 tonnellate al giorno solamente a La Solfatara, per circa 0,5 km² di estensione) mostrano che l'intero processo è sostenuto da una sorgente di fluidi difficilmente conciliabile con un piccolo serbatoio magmatico sub-superficiale, come dedotto dalle analisi delle deformazioni del suolo e delle variazioni gravimetriche registrate negli anni 1982-85, dai risultati delle indagini della tomografia sismica di attenuazione e da dati isotopici e calcoli termodinamici. Tutti questi studi hanno suggerito che l'intrusione magmatica superficiale responsabile dell'evento bradisismico del 1982-85 avesse un volume di circa 2,1·10⁷ m³, fosse satura in componenti volatili e presentasse una fase gassosa essolta, tale per cui la sua densità sarebbe stata di circa 2.000 kg m⁻³. Sulla base degli stessi dati, si ritiene che tale intrusione fosse già largamente cristallizzata 20-30 anni dopo la sua messa in posto, dopo essere stata la sorgente dei gas immessi nel sistema geotermale, e avere contribuito significativamente con il suo degassamento alle emissioni fumaroliche.

Utilizzando quale contenuto iniziale di gas dell'intrusione magmatica del 1982-85, il contenuto in gas determinato per i magmi alimentanti le eruzioni flegree delle ultime migliaia di anni, quali ad esempio quella di Agnano-Monte Spina avvenuta 4.600 anni fa, sono state calcolate quantità e composizione chimica dei

gas essolti durante il progressivo raffreddamento e cristallizzazione. Tale processo dovrebbe aver prodotto gas progressivamente impoveriti in CO₂ e arricchiti in H₂O, H₂S e SO₂ (quest'ultimo facilmente rimosso dal sistema idrotermale). Tuttavia il chimismo attuale delle fumarole non fornisce riscontro a questa evoluzione, pur mostrando variazioni ascrivibili a un ingresso di nuovi gas magmatici.

Quanto descritto dimostra che, benché il corpo magmatico superficiale debba avere avuto un'azione importante nell'iniettare gas nel sistema idrotermale sovrastante e nelle fumarole, il solo suo degassamento non riuscirebbe a spiegare le caratteristiche compostionali delle emissioni fumaroliche di La Solfatara e le relative variazioni temporali. Esse sarebbero coerenti con il coinvolgimento di almeno due sorgenti di degassamento magmatico che differiscono in ubicazione (superficiale e profonda), dimensioni e storia di raffreddamento/cristallizzazione, operanti dopo la messa in posto del corpo magmatico superficiale. La diversa solubilità dei gas in questi due corpi (essenzialmente a causa delle differenze di carico, temperatura e grado di cristallizzazione) fa sì che il corpo superficiale dovrebbe essere stato periodicamente infiltrato e "ricaricato" da gas ricco in CO₂, di provenienza profonda. L'implicazione che ne deriva è che il contributo alle fumarole dalla sorgente magmatica superficiale, in via di cristallizzazione, deve essere diminuito progressivamente fino a diventare trascurabile, lasciando, durante gli ultimi anni, il solo contributo della sorgente più profonda, che probabilmente coincide con il grande serbatoio magmatico localizzato a 8 km di profondità al di sotto della caldera dei Campi Flegrei. Un tale processo si manifesta nel diverso *pattern* mostrato dopo l'anno 2000 dalla composizione dei gas fumarolici, dal continuo aumento della frazione dei gas magmatici emessi (vedi l'articolo di

M. Martini in questo numero), e potrebbe essere compatibile con la dinamica dell'*unrest* in atto, marcata da un lento ma continuo sollevamento del suolo. Nell'ambito di una tale evoluzione, la domanda da porsi per ipotizzare possibili scenari futuri è: «Qual è il destino del corpo magmatico superficiale che ha probabilmente causato l'episodio bradisismico del 1982-85 ai Campi Flegrei?».

Gli scenari possibili sono tre:

1. Persistenza del solo degassamento profondo: il corpo magmatico superficiale, messo in posto all'inizio del 1982 a circa 4 km di profondità, da quel momento ha iniziato a cristallizzare e degassare, e ha alimentato il sistema idrotermale con una miscela di gas di composizione variabile. Dopo circa 30 anni esso è completamente cristallizzato, e il sistema idrotermale è alimentato solamente e direttamente dai gas profondi rilasciati dal magma localizzato a 8 km di profondità (Figura 3).

2. Il corpo magmatico superficiale cristallizzato, subisce una rifusione a causa dell'arrivo dei gas profondi (in funzione del loro flusso e della loro entalpia) e il suo degassamento, una volta rifuso, alimenta il sistema idrotermale sovrastante. Tale scenario prevede che la sorgente della deformazione attuale sia a 4-5 km di profondità, e sul medio-lungo termine il ritorno a un chimismo dei gas delle fumarole simile a quello del 1982-85.
3. Magma del serbatoio profondo, localizzato a 8 km di profondità al di sotto dei Campi Flegrei, risale verso il corpo magmatico intruso a relativamente bassa profondità, parzialmente o totalmente cristallizzato. Anche in questo caso, sul medio e lungo termine, si prevede il ritorno a un chimismo dei gas delle fumarole simile a quello del 1982-85. Va considerato che dati petrologici sui prodotti delle eruzioni flegree mostrano che queste, nella maggior parte dei casi, avvengono dopo episodi

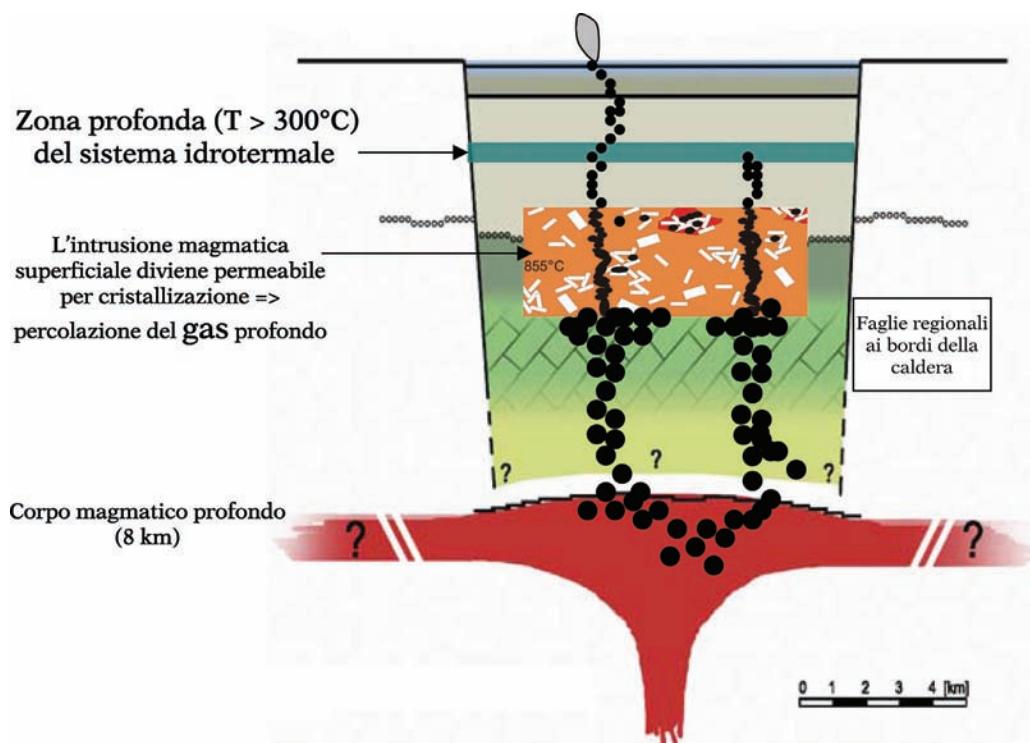


Figura 3. Sketch dello scenario che prevede degassamento profondo (da 8 km) e risalita dei gas attraverso l'intrusione magmatica superficiale cristallizzata e permeabile (modificata da Zollo et al. (2008)).

di arrivo di nuovo magma profondo ricco in gas e susseguente mescolamento con magmi residenti nel sistema superficiale. Questo dato potrebbe suggerire che l'arrivo a circa 4-5 km di profondità di un magma profondo, e il mescolamento con il magma cristallizzato residente, potrebbero innescare una nuova eruzione.

Questi tre scenari hanno implicazioni estremamente contrastanti per la pericolosità vulcanica, e possono essere valutati al meglio considerando i relativi segnali geofisici che dovrebbero essere generati. Ad esempio, anomalie gravimetriche relative all'arrivo di una nuova massa di magma sono possibili solo nello scenario 3, mentre gli scenari 1 e 2 potrebbero benissimo richiedere tassi di sollevamento del suolo relativamente bassi rispetto a quelli osservati durante la fase iniziale dell'evento bradisismico del 1982-85. D'altro canto, le anomalie geochimiche possono trovare immediato riscontro all'interno di tutti questi scenari, tenendo conto delle sorgenti di fluidi a diversa profondità, menzionate in precedenza. Per concludere, risulta importante che gli approcci puramente probabilistici, fondamentali nel decidere le soglie caratteristiche del fenomeno di *unrest* (ad esempio, *unrest* idrotermale verso *unrest* magmatico), siano accompagnati da valutazioni deterministiche dell'insieme delle variazioni osservate nei segnali geofisici e geochimici all'interno di un'unica ipotesi di riferimento compatibile con la dinamica recente (ultimi 5.000 anni) dei Campi Flegrei, nota su base vulcanologica oltreché storica.

Bibliografia

- Agip (1987). *Modello geotermico del sistema flegreo* (Sintesi). Report, 23 pp., Servizi Centrali per l'Esplorazione, Settore Esplorazione e Ricerca, San Donato Milanese, Italia.
Arienzo I., Moretti R., Civetta L., Orsi G., Papale P., 2010. The feeding system of Agnano-Monte Spi-

na eruption Campi Flegrei (Italy): Dragging the past into present activity and future scenarios. *Chemical Geology*, 270, 135-147.

- Chioldini G., Caliro S., Cardellini C., Granieri D., Avino R., Baldini A., Donnini M., Minopoli C., 2010. Long-term variations of the Campi Flegrei, Italy, volcanic system as revealed by the monitoring of hydrothermal activity. *J. Geophys. Res.*, 115, B03205.
Chioldini G., Caliro S., De Martino P., Gherardi F., 2012. Early signals of new volcanic unrest at Campi Flegrei caldera? Insights from geochemical data and physical simulations. *Geology*, doi:10.1130/G33251.1.
D'Auria L., Giudicepietro F., Aquino I., Borriello G., Del Gaudio C., Lo Bascio D., Martini M., Ricciardi G.P., Ricciolino P., Ricco C., 2011. Repeated fluid transfer episodes as a mechanism for the recent dynamics of Campi Flegrei caldera (1989-2010). *J. Geophys. Res.* 116, B04313.
De Siena L., Del Pezzo E., Bianco F., 2010. Seismic attenuation imaging of Campi Flegrei: Evidence of gas reservoirs, hydrothermal basins, and feeding systems. *J. Geophys. Res.* 115, B09312.
Di Renzo V., Arienzo I., Civetta L., D'Antonio M., Tonarini S., Di Vito MA., Orsi G., 2011. The magmatic feeding system of the Campi Flegrei caldera: Architecture and temporal evolution. *Chemical Geology* 281, 227-241.
Longo A., M. Vassalli, P. Papale, M. Barsanti. 2006. Numerical simulation of convection and mixing in magma chambers replenished with CO₂-rich magma. *Geophys. Res. Lett.* 33, L21305.
Mangiacapra A., Moretti R., Rutherford M., Civetta L., Orsi G., Papale P., 2008. The deep magmatic system of the Campi Flegrei caldera (Italy). *Geophys. Res. Lett.* 35, L21304.
Moretti R., Orsi G., Civetta L., Arienzo I., Papale P., 2013. Multiple magma degassing sources at an explosive volcano. *Earth Planet. Sci. Lett.*, in pubblicazione.
Orsi G., de Vita S., Di Vito MA., 1996. The restless, resurgent Campi Flegrei nested caldera (Italy): constraints on its evolution and configuration. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 74, 179-214.
Orsi G., Di Vito MA., Isaia R., 2004. Volcanic hazard assessment at the restless Campi Flegrei caldera. *Bull. Volcanol.* 66, 514-530.
Trasatti E., Bonafede M., Ferrari C., Giunchi C., Berrino G., 2011. On deformation sources in volcanic areas: modeling the Campi Flegrei (Italy) 1982-84 unrest. *Earth Planet. Sci. Lett.* 306, 175-185.
Zollo A., Maercklin N., Vassallo M., Dello Iacono D., Virieux J., Gasparini P., 2008. Seismic reflections reveal a massive melt layer under Campi Flegrei volcanic field. *Geophys. Res. Lett.* 35, L12306.

Struttura e storia dei Campi Flegrei

Giovanni Orsi, Aldo Zollo

L'attività vulcanica nell'area flegrea è iniziata più di 60.000 anni fa e la caldera dei Campi Flegrei è oggi ritenuta tra i pochi "super vulcani" al mondo. Malgrado ciò è stata ed è sede di rilevanti presenze di popolazione costituendo un ottimo esempio di una millenaria interazione tra uomo e vulcani attivi.

L'assetto geologico e la morfologia dell'area napoletana sono dominati dalla presenza di quattro vulcani: lo strato-vulcano Somma-Vesuvio, le caldere risorgenti dei Campi Flegrei e di Ischia, e il campo vulcanico di Procida (Figura 1). Campi Flegrei, Somma-Vesuvio e Ischia sono sistemi ancora attivi. La persistente attività della caldera dei Campi Flegrei (CF) è testimoniata dall'ultima eruzione del 1538, dall'intensa attività fumarolica e idrotermale, che, come suggerito dal nome ad essi attribuito dai primi coloni greci (*ψλεψπατος* = ardente), perdura da millenni, e dai frequenti eventi bradisismici con deformazione del suolo accompagnata da sismicità e variazioni delle caratteristiche chimico-fisiche dei fluidi emessi dalle fumarole.

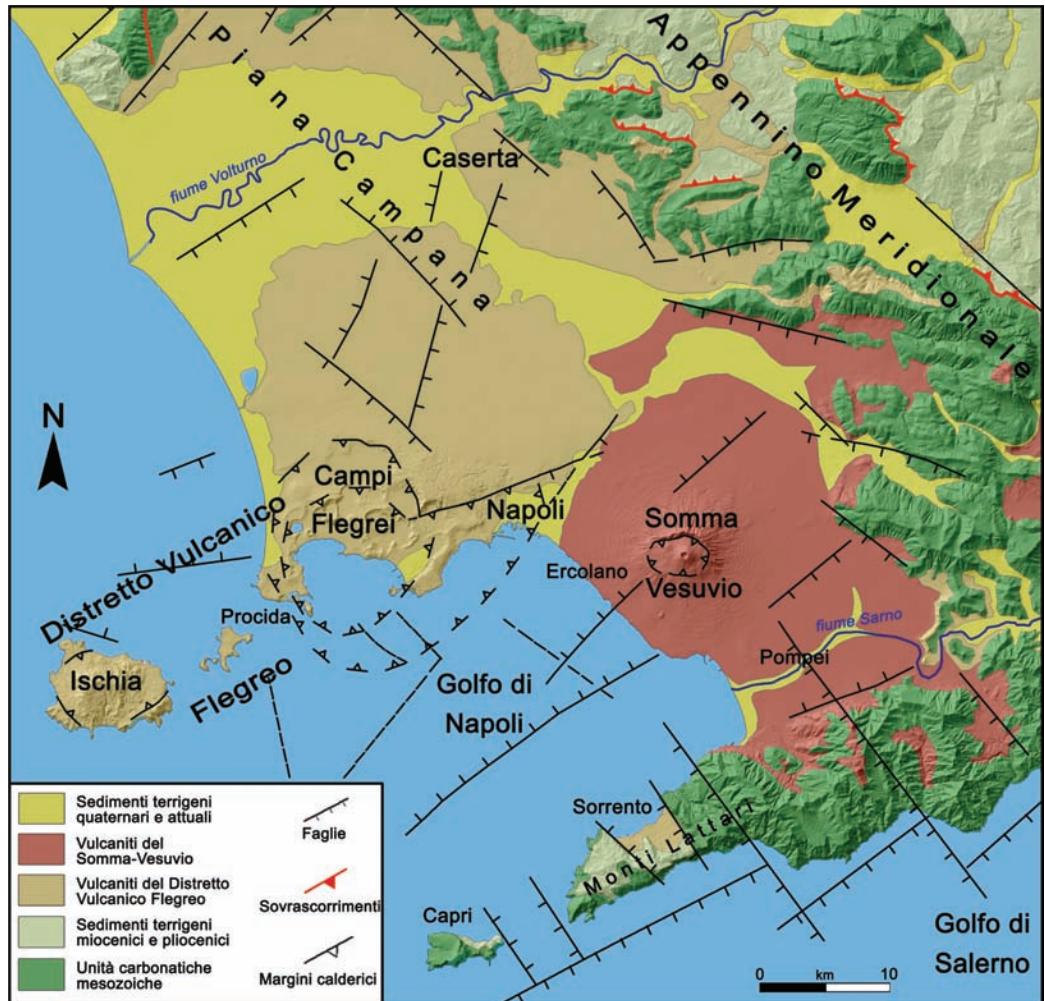
La caldera dei CF, costituita da una parte emersa e una sommersa, ha forma e morfologia molto complesse risultanti da eventi costruttivi (formazione di nuove rocce) e distruttivi (deformazione vulcano-tettonica), generalmente alternanti, a volte coevi (Figura 2). Variazioni del rapporto tra livello del mare e del suolo nello spazio e nel tempo hanno anche contribuito alla definizione dell'attuale assetto morfologico. La parte emersa della caldera include i Campi Flegrei e la città di Napoli. I Campi Flegrei, con la tipica forma a ferro di cavallo, circondano la Baia di Pozzuoli, alla quale si connettono, nel loro settore centrale, attraverso una falesia ad alto angolo erosa nel terrazzo

marino di La Starza. La parte sommersa include il settore nord-occidentale della Baia di Napoli e la Baia di Pozzuoli. La continuazione degli elementi geologici e strutturali fra le due parti è stata ben evidenziata dai risultati di studi morfologici, sismici, gravimetrici e magnetici.

L'attività vulcanica nell'area flegrea è iniziata più di 60.000 anni fa, su una superficie più ampia dell'attuale caldera, che è una caldera complessa formatasi in seguito alle eruzioni dell'Ignimbrite Campana (IC; 39.000 anni) e del Tufo Giallo Napoletano (TGN; 15.000 anni) e deformata da un processo di risorgenza del fondo del più recente collasso che è ancora in corso [1, 2]. La geometria e la dinamica dei collassi calderici sono state influenzate dall'assetto strutturale e hanno, a loro volta, determinato le condizioni del vulcano, incluso il sistema di alimentazione magmatica e la distribuzione dei centri del successivo vulcanismo all'interno della nuova caldera.

L'eruzione dell'IC e il relativo collasso calderico è stato il primo evento a influenzare profondamente l'attuale assetto geologico dell'area. Questa eruzione, l'evento a più alta magnitudo degli ultimi 200.000 anni nell'area mediterranea, ha estruso almeno 300 km³ di magma, attraverso colonne eruttive che raggiunsero altezze di oltre 40 km e flussi piroclastici tanto espansi da scorrere al di sopra del mare e sormontare barriere montuose di oltre 1.000 m di altezza [3, 4]. Per questa ragione la caldera dei CF è

Figura 1. Carta geologico-strutturale della Piana Campana (modificata da Orsi et al., 1996).



oggi ritenuta tra i pochi “super vulcani” al mondo.

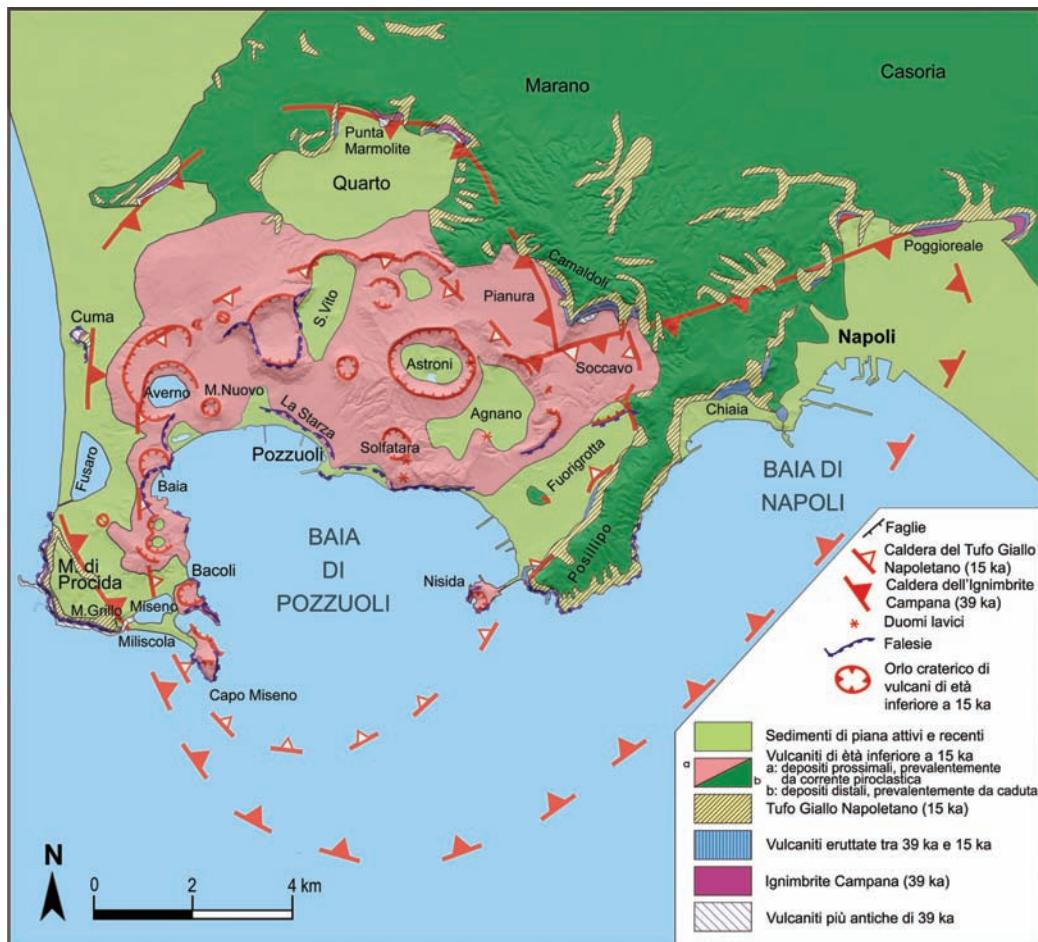
Il vulcanismo tra le eruzioni dell'IC e del TGN fu confinato all'interno della caldera dell'IC e caratterizzato da eruzioni esplosive, prevalentemente freato-magmatiche.

L'eruzione del TGN, con il relativo collasso calderico, è stato il secondo e ultimo evento catastrofico della caldera e ha di nuovo modificato significativamente l'assetto del sistema. L'eruzione, la più grande eruzione freato-pliniana trachitica conosciuta, estruse non meno di 50 km³ di magma, attraverso una sequenza di fasi esplosive freato-pliniane alternanti a magmatiche, seguite da fasi freato-mag-

matiche e magmatiche [5]. Essa formò il tufo che, generalmente zeolitzato e di colore giallo, da cui il nome, coprì un'area di circa 1.000 km². La caldera del TGN produsse il collasso di un'area di circa 90 km² all'interno di quella dell'IC, che è stata poi la sede di un intenso vulcanismo e della risorgenza ancora in atto.

Il vulcanismo successivo ha prodotto non meno di 70 eruzioni, concentrate in tre epoche di attività alternate a periodi di quiescenza [6] e l'evento più recente che ha formato il Monte Nuovo nel 1538 [7], dopo circa 3.800 anni di quiescenza dalla fine della terza epoca. La prima epoca durò tra 15.000 e 10.900 anni fa, la seconda tra 9.500 e 9.200 anni fa e la terza

Figura 2. Carta geologica schematica della caldera dei Campi Flegrei (semplificata da Orsi et al., 1996).



tra 5.500 e 4.200 anni fa. La stragrande maggioranza delle eruzioni delle tre epoche, così come quella di Monte Nuovo, che fu preceduta da decenni di fenomeni precursori, sono state esplosive e caratterizzate dall'alternanza di fasi freatomagnetiche e magmatiche, che hanno prodotto rispettivamente correnti piroclastiche diluite e turbolenti con formazione di depositi da surge, e colonne sostenute con caduta di particelle. L'evento a più alta magnitudo di questa epoca, avvenuto 4.600 anni fa, è stata l'eruzione di Agnano-Monte Spina, accompagnata da un collasso vulcano-tettonico che formò l'attuale basso morfologico della piana di Agnano. Durante ciascuna epoca, le eruzioni si sono succedute a intervalli medi di decine di anni, con i centri erut-

tivi ubicati o lungo il margine strutturale della caldera o lungo alcuni dei margini del blocco risorgente.

La risorgenza della caldera del TGN è avvenuta attraverso un meccanismo che ha determinato la fratturazione del suo fondo in blocchi e il sollevamento della porzione centrale, principalmente attraverso faglie a direzione NO-SE e NE-SO, con uno spostamento massimo misurabile nella parte emersa di circa 90 m del terrazzo marino di La Starza. L'ubicazione dei centri eruttivi è un ottimo tracciante delle strutture attive nel tempo. Quelli della prima e seconda epoca si aprirono lungo le faglie marginali della caldera, mentre quelli della terza epoca, principalmente lungo alcuni lineamenti del blocco risorgente nella por-

zione nord-orientale della caldera. Questo è stato interpretato come un'evidenza che, prima dell'inizio della terza epoca, un nuovo regime di stress si instaurò nella caldera e determinò compressione nella parte centrale del suo fondo, nella Baia di Pozzuoli, ed estensione in quella nord-orientale, corrispondente all'area tra le piane di Agnano e San Vito [2]. Negli ultimi 2.000 anni, cioè dall'epoca romana, il fondo della caldera del TGN è stato interessato da movimenti del suolo, macroscopicamente documentati al Serapeo di Pozzuoli. Dalla fine degli anni Sessanta del secolo scorso, episodi bradisismici, documentati dai dati registrati dalle reti di monitoraggio geofisiche e geochimiche, sono stati percepiti anche dalla popolazione. Due principali eventi si sono verificati nel 1969-72 e nel 1982-85, producendo rispettivamente 170 e 180 cm di sollevamento del suolo (vedi gli articoli di P. Gasparini, M. Martini e G. Luongo). Durante l'evento del 1982-85, sono stati registrati più di 20.000 microterremoti localizzati entro i primi 3-4 km di profondità, con Magnitudo compresa tra -1 e 4. L'ultimo degli eventi bradisismici maggiori è stato seguito da una generale subsidenza interrotta da eventi di sollevamento minori nel 1988-89 (7 cm), 1994 (< 1 cm), 2000 (4 cm), 2004-06 (5 cm) e un ultimo ancora in atto [8]. La dinamica di questi episodi bradisismici ha suggerito che il regime di stress istauratosi prima dell'inizio della terza epoca, persiste tuttora e che essi sono interpretabili come episodi transienti, di breve termine, nell'ambito della deformazione, di lungo termine, legata alla risorgenza [2]. La struttura interna della caldera è stata indagata in dettaglio negli ultimi 30 anni attraverso perforazioni profonde (1-3 km), studi tomografici basati su dati di terremoti locali e telesismi, indagini gravimetriche e magnetiche, misure di temperatura in profondità e di flusso di calore in superficie. Immagini ad alta risoluzione della struttura calderica

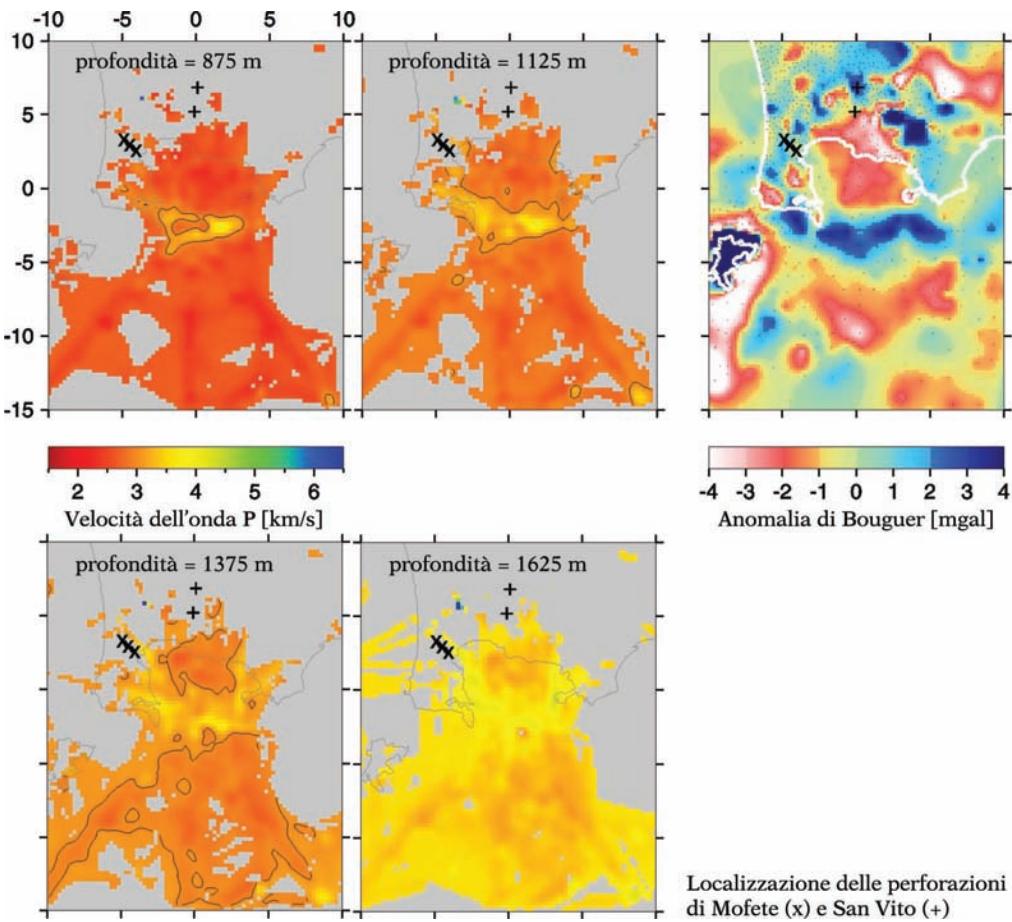
sono state ottenute dall'analisi di dati di sismica a riflessione acquisiti durante l'esperimento SERAPIS nel 2001, supportate dalla nave oceanografica Nadir dell'Ifremer e dall'installazione di più di 60 sismometri da fondale marino nelle baie di Napoli e Pozzuoli.

Le immagini 3D del sottosuolo flegreo hanno evidenziato la presenza, tra circa 800 e 2.000 m di profondità, di un volume di roccia ad alta velocità delle onde sismiche e alta densità, di forma anulare, con diametro di circa 8-12 km e altezza di circa 1-2 km (Figura 3). Sulla base di dati stratigrafici e delle velocità delle onde sismiche misurate in pozzo e raffrontate con i risultati delle misure tomografiche, la struttura anulare è stata interpretata come il bordo sepolto (profondo) della caldera, caratterizzato da faglie e fratture intruse da magma, oggi solidificato. Questo bordo è stato anche evidenziato dalla distribuzione spaziale di anomalie gravimetriche e magnetiche. Gli stessi studi tomografici hanno rivelato la presenza di una formazione di roccia, altamente fratturata, percolata da gas e/o liquido a circa 3 km di profondità, dove si riscontra una concentrazione degli ipocentri dei terremoti durante le crisi bradisistiche. La temperatura di circa 400°C misurata a 3 km di profondità in uno dei pozzi esplorativi effettuati nella caldera, suggerisce la probabile saturazione delle rocce da parte di un fluido prossimo alle condizioni critiche o supercritiche.

I profili di sismica a riflessione più profondi suggeriscono la presenza del tetto del basamento carbonatico Mesozoico a una profondità non inferiore a 4-5 km [9, 10] al di sotto della caldera, in continuità con i risultati della campagna SERAPIS e di campagne precedenti nel Golfo di Napoli.

A circa 8 km di profondità, l'analisi delle fasi sismiche riflesse e convertite evidenzia uno strato a bassissima velocità delle onde P ed S, con spessore dell'ordi-

Figura 3.
 Distribuzione della velocità delle onde P ottenuta dalla ricostruzione tomografica 3D a partire dai dati registrati durante l'esperimento SERAPIS2001. Le immagini tomografiche sono rappresentate per diverse profondità (875 m, 1125 m, 1375 m e 1625 m). I simboli "+" and "-" indicano le posizioni delle perforazioni effettuate dall'AGIP alla fine degli anni Settanta nelle località di S. Vito e Mofete, per scopi industriali, cioè sfruttamento dell'energia geotermica. La figura in alto a destra mostra invece la mappa, filtrata a bassa frequenza, delle anomalie di Bouguer, che evidenziano regioni ad alta densità (in blu) rispetto a quelle a densità minore (rosso/giallo). Le immagini delle proprietà elastiche del sottosuolo evidenziano con chiarezza la forma anulare dell'anomalia associabile al bordo sepolto della caldera flegrea (da Zollo et al., 2002).



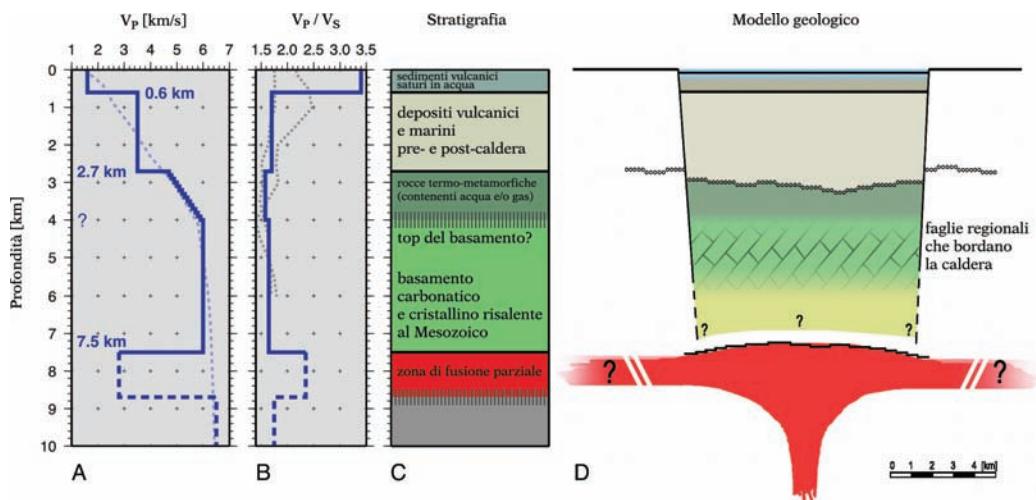
ne di 1 km, che è stato interpretato come una zona di fusione parziale della crosta superiore che si estende su di un'ampia superficie anche oltre il bordo calderico [11] (Figura 4).

Il lato orientale della caldera appare confinato da un'imponente faglia normale con direzione SO-NE che interessa il basamento carbonatico che soggiace alla struttura vulcanica fino a una profondità di 4-5 km e con un'altezza di scarpata non inferiore a 1 km. Questa evidenza conferma la relazione tra l'attività vulcanica dei Campi Flegrei e la presenza di fratture nella crosta superficiale che rappresenterebbero delle vie preferenziali per la risalita dei magmi da una sorgente profonda.

Uno studio recente di tomografia di attenuazione delle onde sismiche evidenzia

la presenza di piccoli volumi di materiale fuso a profondità di 4-5 km [12], compatibile con evidenze petrologiche e geochimiche, ma non evidenziata dalla tomografia di velocità delle onde sismiche nelle stesse zone [13]. Poiché la risoluzione del metodo tomografico degrada con la dimensione dell'anomalia, è molto probabile che la dimensione chilometrica di volumi di roccia ad alta attenuazione e bassa velocità rappresenti il limite inferiore della risoluzione spaziale di tecniche tomografiche per la ricostruzione di immagini del sottosuolo in quest'area. Sistemi di osservazione a più alta risoluzione, come le antenne sismiche bidimensionali o tridimensionali, potrebbero nel futuro chiarire con maggiore certezza l'eventuale presenza di piccoli volumi di magma a bassa profondità.

Figura 4. Modello schematico, geofisico e strutturale 1D della struttura profonda della caldera dei Campi Flegrei ottenuto dall'analisi delle fasi riflesse convertite registrate durante l'esperimento SERAPIS2001 (modificato da Zollo et al., 2008).
A: Modello medio 1D della velocità delle onde P, basato sulla modellazione dei tempi di arrivo delle fasi riflesse PP e convertito PS e sui rapporti d'ampiezza tra le stesse fasi. La linea tratteggiata indica il modello medio 1D ottenuto dal modello tomografico 3D per l'area, ottenuto da studi precedenti.
B: Andamento con la profondità del rapporto V_p/V_s che denota la presenza di zone di materiale saturate in fluidi e/o gas. Le linee punteggiate rappresentano i profili stimati dall'analisi dei dati dei terremoti locali da studi precedenti.
C: Modello stratigrafico.
D: Schema geologico risultante per la struttura profonda della caldera dei Campi Flegrei.



L'area napoletana, nonostante la presenza di vulcani attivi, è abitata da millenni da esseri umani. Questi erano nell'area già 39.000 anni fa, al tempo della catastrofica eruzione dell'IC, mentre negli ultimi 15.000 anni, dopo l'eruzione del TGN, gruppi organizzati in comunità hanno abitato con continuità la Piana Campana. Pertanto l'area napoletana è un ottimo esempio di una millenaria interazione tra uomo e vulcani attivi. Gli insediamenti umani sono andati crescendo nel tempo, nonostante i pericoli vulcanici, a causa della fertilità del suolo, della mitezza del clima e della posizione strategicamente favorevole dell'area nell'ambito del bacino del Mediterraneo. I vulcani attivi sono una sorgente di pericoli. Inoltre, i fenomeni connessi alla loro attività quali sismicità e diffusa emissione di gas, e la loro azione costruttiva e distruttiva, creano le condizioni per ulteriori pericoli. L'uomo deve trovare le condizioni favorevoli alla sua vita, ma la sua presenza e la ricerca di queste condizioni determinano un aumento del rischio, ancor più quando la pianificazione dello sviluppo del territorio circostante un vulcano attivo non considera che eventi vulcanici catastrofici hanno tempi di ricorrenza più lunghi della vita dell'uomo. Negli ultimi decenni le autorità, sollecitate dalla comunità scientifica, hanno

realizzato che la pericolosità vulcanica deve essere valutata e azioni tendenti alla mitigazione del relativo rischio devono essere pianificate. Pertanto sono state incoraggiate ricerche vulcanologiche e attività di monitoraggio e sono stati elaborati piani di emergenza.

Sulla base della storia vulcanica e deformativa degli ultimi 15.000 anni della caldera dei Campi Flegrei, e della dinamica in atto che persiste da prima dell'inizio della terza epoca di attività, è stato suggerito che per una valutazione di pericolosità vulcanica a lungo termine e una previsione del tipo e dimensione della prossima eruzione, deve essere presa in considerazione la parte di storia della caldera relativa agli ultimi 5.000 anni [14]. Il tempo e l'ubicazione della bocca della prossima eruzione dipenderà dal regime di stress, benché la formazione di sovrappressione non correlata a processi tettonici non può essere esclusa come elemento innescante un'eruzione. Successive analisi quantitative e probabilistiche hanno dettagliato alcuni aspetti della pericolosità vulcanica a lungo termine quali stile e dimensione della futura eruzione [6], aree interessate dalla caduta di particelle [15] e ubicazione del centro eruttivo [16]. Una futura eruzione esplosiva verosimilmente avrà fasi magmatiche e freato-magmatiche che produrranno rispettivamente co-

lonne sostenute con caduta di particelle e scorimento di correnti piroclastiche. Considerando i brevi intervalli di tempo con cui si sono succedute le eruzioni della terza epoca, e più in generale degli ultimi 15.000 anni, una futura eruzione potrebbe essere il primo di una serie di eventi ravvicinati nel tempo.

Infine è opportuno ricordare che i danni prodotti agli edifici dalla deformazione del suolo associata al sollevamento del 1982-85, l'intensa attività microsismica, chiaramente avvertita dalla popolazione e il timore di una possibile eruzione, hanno indotto le autorità locali a ordinare l'evacuazione di vaste aree della cittadina di Pozzuoli, dove si aveva il picco del sollevamento del suolo. L'esperienza che deriva dalle osservazioni strumentali e dalle cronache storiche di crisi passate, sembra indicare che in quest'area vulcanica i fenomeni deformativi e sismici, che possono precedere un eventuale fenomeno eruttivo, possono essere così intensi e duraturi nel tempo da dover richiedere l'attivazione di azioni di messa in sicurezza delle popolazioni, ben prima e indipendentemente dall'occorrenza dell'eruzione.

Bibliografia

1. Orsi G., de Vita S., Di Vito M., 1996. The restless, resurgent Campi Flegrei nested caldera (Italy): constraints on its evolution and configuration. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 74, 179-214.
2. Orsi G., Civetta L., Del Gaudio C., de Vita S., Di Vito M.A., Isaia R., Petruzzuoli S.M., Ricciardi G., Ricco C., 1999. Short-term ground deformations and seismicity in the nested Campi Flegrei caldera (Italy): an example of active block-resurgence in a densely populated area. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 91 (2-4), 415-451.
3. Rosi M., Vezzoli L., Castelmenzano A., Greco G., 1999. Plinian pumice fall deposit of the Campanian Ignimbrite eruption (Phlegraean Fields Italy). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 91, 179-198.
4. Ort M., Orsi G., Pappalardo L., Fisher R.V., 2003. Emplacement processes in a far-traveled dilute pyroclastic current: anisotropy of magnetic susceptibility studies of the Campanian Ignimbrite. *Bull. Volcanol.*, 65: 55-72.
5. Orsi G., Civetta L., D'Antonio M., Di Girolamo P., Piocchi M., 1995. Step-filling and development of a three-layers magma chamber: The Neapolitan Yellow Tuff case history. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 67, 291-312.
6. Orsi G., Di Vito M., Selva J., Marzocchi W., 2009. Long-term forecast of eruption style and size at Campi Flegrei caldera (Italy). *Earth Planet. Sci. Lett.* 287, 265-276.
7. Guidoboni E., Ciuccarelli C., 2011. The Campi Flegrei caldera: historical revision and new data on seismic crises, bradyseisms, the Monte Nuovo eruption and ensuing earthquakes (twelfth century 1582 AD). *Bull. Volcanol.* 73 (6), 655-677.
8. Del Gaudio C., Aquino I., Ricciardi G.P., Ricco C., Scandone R., 2010. Unrest episodes at Campi Flegrei: A reconstruction of vertical ground movements during 1905-2009. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 19, 548-56.
9. Judenherc S., Zollo A., 2004. The Bay of Naples (southern Italy): Constraints on the volcanic structures inferred from a dense seismic survey. *J. Geophys. Res.* 109, B10312.
10. Vanorio T., Virieux J., Zollo A., Capuano P., Russo G., 2006. A Rock Physics and Seismic Tomography Study to Characterize the Structure of the Campi Flegrei Caldera. In: Zollo, A., et al. (Ed.), *Geophysical Exploration of the Campi Flegrei (southern Italy) Caldera Interiors: Data, Methods and Results*. INGV, Napoli, pp. 25-33.
11. Zollo A., Maercklin N., Vassallo M., Dello Iacono D., Virieux J., Gasparini P., 2008. Seismic reflections reveal a massive melt layer feeding Campi Flegrei caldera. *Geophys. Res. Lett.* 35.
12. De Siena L., Del Pezzo E., Bianco F., 2010. Seismic attenuation imaging of Campi Flegrei: Evidence of gas reservoirs, hydrothermal basins, and feeding systems. *J. Geophys. Res.*, 115.
13. Battaglia J., Zollo A., Virieux J., and Dello Iacono D., 2008. Merging active and passive data sets in travelttime tomography: The case study of Campi Flegrei caldera (southern Italy). *Geophys. Prospect.*, 56, 555-573.
14. Orsi G., Di Vito M.A., Isaia R., 2004. Volcanic hazard assessment at the restless Campi Flegrei caldera. *Bull. Volcanol.*, 66, 514-530.
15. Costa A., Dell'Erba F., Di Vito M., Isaia R., Macedonio G., Orsi G., Pfeiffer T., 2009. Tephra fallout hazard assessment at the Campi Flegrei caldera (Italy). *Bull. Volcanol.*, 71, 259-273.
16. Selva J., Orsi G., Di Vito M., Marzocchi W., Sandri L., 2012. Probability hazard map for future vent opening at the Campi Flegrei caldera, Italy. *Bull. Volcanol.*, 74, 497-510.
17. Zollo A., Judenherc S., Auger E., D'Auria L., Virieux J., Capuano P., Chiarabba C., de Franco R., Makris J., Michelini A., Musacchio G., 2002. Evidence for the buried rim of Campi Flegrei caldera from 3-d active seismic imaging. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 19.

Cronache di un'eruzione: la nascita di Monte Nuovo nel 1538

Roberto Scandone, Lisetta Giacomelli

Dal 1500 numerosi segnali macroscopici anticiparono l'eruzione del 1538. Una nuova forte crisi sismica avvenne nel 1537-1538, con il culmine nella notte fra il 28 e 29 settembre 1538 nell'area dove poi sarebbe cresciuto Monte Nuovo. L'eruzione non fu particolarmente violenta, ma ebbe grande ripercussione sull'economia e sul tessuto sociale dell'area.

Nel 1429, la regina Giovanna II di Napoli concesse all'Ospedale dell'Annunziata «le terre che vanno dal Cantarello al mare». Sebbene fosse noto da tempo, solo recentemente si è riconosciuto in questo editto il primo atto ufficiale che testimonia il progressivo sollevamento del suolo nei Campi Flegrei che culminerà, oltre cento anni dopo, nell'eruzione di Monte Nuovo.

Il Cantarello era una sorgente termominerale che scaturiva dal lato nord-est del complesso del Serapeo a Pozzuoli, dove peraltro ancora oggi si trova. La sorgente, conosciuta e utilizzata fin dal periodo romano, era stata poi sommersa dal mare per effetto del bradisismo discendente. Nel Medioevo, nonostante fosse descritta «inter aqua spelagi», la fonte del Cantarello era ancora frequentata ma, per impedire che si disperdesse in mare, l'acqua era raccolta per mezzo di un contenitore rotondo (cantarello). Alcune incisioni dei primi anni del 1400, mostrano il bagno del Cantarello in vicinanza del mare («propinquu a lo mare»), con le tre colonne del Serapeo ancora sommerse. L'editto di Giovanna II, di pochi anni successivo all'incisione, indica che il sollevamento del terreno era ormai così avanzato da richiedere un atto ufficiale che sancisse la proprietà delle terre emerse.

Analogamente, con un editto del 6 ottobre 1503, «li cattolici Re e Regina [Ferdinando e Isabella] avevano cedu-

to all'Università di Pozzuoli lo demanio della detta Università; quale demanio è quello che va seccando il mare entro la terra».

Tuttavia all'inizio del 1500, insieme al rigonfiamento del suolo, un ancor più violento fenomeno colpiva l'area di Pozzuoli. Un manoscritto del 1507 (MsVindoboniensis 3546) descrive i danni causati da continui terremoti alla chiesa di San Procolo a Pozzuoli («cetera propter fracturam ex continuo terraemotu factam»). La situazione divenne così critica da costringere il Re Ferdinando a emettere un nuovo editto, il 23 maggio 1511, in cui si concedevano alla città di Pozzuoli i territori creati dall'avanzamento della linea di costa («quoddam demaniale territorium mare dessicatum circum circa prefatam civitatem Puteolarum») in riparazione dei danni causati dai terremoti («Cumque universitas ipsa plerumque ob terremotus ex quibus singulis annis maximum perpeti solet incommodum jacturam que et domorum ruinam non mediocrem»).

Negli anni successivi, i terremoti divennero sempre più frequenti. In un manoscritto di Cola Anello Pacca, mai pubblicato ma citato da Mercalli, si legge che «... dal detto anno 1536 sino ai 28 di settembre del 1538 in Napoli, in Pozzuoli e quasi per tutta Terra di Lavoro furono molti e spessi terremoti dei quali alcuni furono d'importanza e altri scossero debilmente la terra, spesso di giorno e tal volta di notte onde tal

giorno fu che più volte s'intesero perché quanto più s'approssimava a noi il detto mese tanto con maggior empito più spessi seguivano i movimenti, talchè a 28 che fu di sabato tra il dì e la notte soccesse il terremoto 20 volte quando portando maggior furia e quando con minor violenza finchè a 29, nel qual dì si celebra la festività di san Michele Arcangelo, che in quell'anno fu di domenica, fra una in due hore di notte in un piano qual era tra'l lago Averno e'l monte Barbaro sotto Pozzuoli enfiandosi la terra s'aperse in molte parti».

Anche la cronaca del 1538 del Delli Falconi conferma queste informazioni: «Sono ormai due anni in Pozzolo, in Napoli e nelle parti circonvicine sono stati spessi terremoti, E nel giorno innanzi che apparve tale incendio tra la notte e il giorno furono sentiti nelli predetti luoghi tra grandi e piccoli più di venti terremoti». Cosa stava avvenendo intorno a Pozzuoli? Un'interpretazione recente suppone che, a partire dal 1400, a una profondità di circa 4-5 km sotto Pozzuoli, diverse intrusioni di magma, avvenute in maniera episodica dall'inizio del '400 fino all'inizio del '500, causassero il rigonfiamento del suolo con il massimo della deformazione proprio in corrispondenza della città. Il sollevamento del suolo in corrispondenza di Pozzuoli raggiungeva circa 8-10 metri, rispetto al livello di massimo abbassamento e sommersione del Serapeo. Alle iniezioni di magma si associano violente crisi sismiche (in particolare negli anni 1507-1508), che causavano estesi danneggiamenti agli edifici della città, come documentato da cronache e editti reali.

Una nuova forte crisi sismica avvenne nel 1537-1538, con il culmine nella notte fra il 28 e 29 settembre 1538, quando le scosse furono talmente violente da seminare il panico generale, così come testimoniato da un abitante di Pozzuoli in una perizia giurata resa circa 50 anni dopo l'eruzione: «Die 30. Mensis

Julii 1587. Puteolis. Magnificus Dominus Antonius Russus de Puteolis aetatis annorum octuaginta et plus in circa testis summarie productus, et medio suo juramento interragatus, et examinatus super tenore Memorialis magnificae Universitatis Puteolanae, dicit: (...) e proprio l'anno 1538, nel giorno di San Geronimo (28 settembre NdR) si sentì per detta Città un gran terremoto, lo quale allo stesso pigliava, e lasciava, e tutta la Città si mise in rivolta, e quasi tutta disabitò, ed andò in Napoli, e per le campagne, chi fuggiva in un luogo, e chi in un'altro, e pareva, che il mondo volesse subissare; e le genti fuggivano etiam alla nuda, ed uscendo esso testimonio co' suoi figliuoli, e sua moglie, ritrovò alla porta di Pozzuoli una donna nominata Zizula, moglie di Mastro Geronimo Barbiero, la quale andava in camicia a cavallo ad uno somiero alla mascolina, scapillata: e tutti piangevano, e gridavano: Misericordia!».

Nel frattempo, in prossimità del villaggio di Tripergole che sorgeva presso il lago di Averno, nell'area dove poi sarebbe cresciuto Monte Nuovo, avvenivano altri eventi straordinari, citati in una lettera di Francesco del Nero a Nicolò del Benino: «A di 28 di Settembre, a 2 ore circa, si seccò il mare di Pozzuolo per spazio di braccia secento talchè i (cittadini) di Pozzuolo presero le carrate del pesce rimasto in secco. A dì 29, ad ore 14, dove oggi è la voragine del fuoco, abbassò la terra dua canne e ne uscì uno umetto di acqua freddissima e chiara, secondo alcuni che abbiamo esaminati. Secondo altri, tiepida e alquanto sulfurea, e perché li uomini esaminati e che fanno tale attestazione sono tutti degni di fé, credo tutti dichino il vero, e che prima uscissi in un modo e poi in uno altro. Anche il medesimo di, a mezzo giorno, cominciò in tal luogo a gonfiare la terra di maniera che dove era abbassata dua canne, ad ore una e mezzo di notte era alta quanto Monte Ruosi».

E il già citato Antonio Russo conferma che: «E come fu verso un'ora in due di notte, uscì una bocca di fuoco, vicino al detto Ospedale, (di Tripergole ndr) nel luogo nominato la Fumosa da dentro mare, e menava gran moltitudine di pietre pomici, e di arena, e si sentivano gran tuoni, e lampi; ed in cambio di acqua pioveva arena, e venne detta bocca di fuoco così aperta ad accostarsi al Castello, ed Ospedale di Tripergole, e tutto lo sconquassò, e rovinò, e poi lo empì di arena, e di pietre, e vi fece una montagna nuova in ventiquattro ore, dove infino ad oggi si vede».

Il rapido rigonfiamento del suolo in corrispondenza della bocca eruttiva è causato dal magma arrivato ormai vicino alla superficie. A poche centinaia di metri di profondità, il magma provoca la fratturazione e lo sprofondamento del terreno, mentre l'acqua della falda freatica, intercettata dal magma, sgorga in superficie.

Ormai l'eruzione è in pieno sviluppo, come testimonia Delli Falconi: «Et secondo quanto m'è stato riferito, cominciarono a vedersi in quel luogo dal detto sudatoio et Tre Pergule certe fiamme in foco, le quali cominciarono dal detto sudatoio et andavano a Tre Pergule». «Li poveri cittadini di Pozzuoli, sgomenti di questo spettacolo, horribile» scappano verso Napoli «fuggendo la morte col volto però depinto dei suoi colori». «Et le montagne di cenere, pietre et fumo parea che fussero per coprire tutto quel mare et la terra... molti che hanno veduto la cenere che è arrivata a Vallo de Diano et alcune parti de Calabria». «(Il venerdì e il sabato successivo)..., in molti si portarono a constatare che si era fatto un monte in quella valle, che gira circa tre miglia, et è poco meno alto di Monte Barbaro, che gli sta incontro et ha coperto lo castello di Tre Pergule et tutti quelli edifici et la maggior parte dei bagni che erano intorno».

Come notato dai testimoni, l'apertura della frattura eruttiva inizia in una

zona che in precedenza era sommersa dal mare e che coincide con l'area ora nota come secca della Fumosa, posta a ridosso di una delle massicciate esterne (Pilae) di quello che era l'antico porto romano (Portus Iulius). Rapidamente la frattura si propaga verso terra in direzione del villaggio di Tripergole, dove si localizzerà la bocca eruttiva principale intorno alla quale crescerà Monte Nuovo.

L'eruzione fu di tipo esplosivo e avvenne in due fasi, distinte da differenti gradi di interazione fra il magma e l'acqua del mare. Nella prima fase si verificò un'intensa frammentazione del magma e si formò una colonna eruttiva carica di pomici e ceneri bagnate che si dispersero in direzione di Napoli. «Ed in tal ora el fuoco aperse e fece quella voragine con tanto impeto e tanto romore e splendore che io al giardino ebbi gran paura, non però di sorte che lo avanti passassi dua terzi di ora, non andassi così mezzo ammalato a certa altezza qui vicino dove vedeva tutto. E per mia fe era bel fuoco che si era levato in capo tanta terra e tanta pietra e del continuo buttava in alto e cadevono allo intorno alla bocca del fuoco che dalla parte del mare empiè un semicirculo di mare che la corda fussi miglio uno» (Del Nero). Intorno alla bocca eruttiva cresce rapidamente un cono formato da ceneri umide, miste a pomici e a frammenti di roccia strappati al condotto (Figura 1). La formazione del cono ha l'effetto di isolare il magma dall'acqua del mare. A questo punto la violenza dell'eruzione diminuisce e la dinamica è governata unicamente dai gas esolti dalla massa magmatica. L'eruzione procede con esplosioni intervallate da pause, come comunemente si osserva a Stromboli, con lanci di scorie incandescenti e ceneri che disegnano in aria traiettorie paraboliche. Il grande effetto scenografico e la somiglianza con i fuochi pirotecnici ispirò, tra stupore e paura, numerose



Figura 1. Il cono di Monte Nuovo e il lago di Averno, circondati dagli edifici sorti negli ultimi decenni (foto Scandone).

descrizioni dell'avvenimento. Nicolò del Benino accosta questa fase dell'eruzione proprio ai fuochi artificiali che si sparavano a Roma da Castel Sant'Angelo: «Però gliela voglio esemplificare, Immaginisi, VS, quella bocca di foco essere il Castel Santo Agnolo, che sia pieno di razzi ritti che tocchino l'uno con altro e sia loro dato foco Non è dubbio che tali razzi benché vadino erti e ritti in nel cadere danno certa volta che non cascono nel Castello donde escono ma in Tevere e in Prati. Imaginisi poi che sieno cadute tante carte di razzi in Tevere che lo abbino ripieno ed alzatovi la carta quattro canne e di verso Prati vi sieno cascate tante che abbino fatto una montagna ».

La successione dei prodotti che corrispondono alle due fasi dell'eruzione è visibile lungo il sentiero dell'Oasi Naturalistica, curata dal Comune di Pozzuoli, che corre ai piedi di Monte Nuovo (Figura 2).

L'eruzione procede con esplosioni sempre più isolate e di violenza decrescente, provocando molti danni ma nessuna vittima. Purtroppo, il 6 ottobre, quando il pericolo sembrava passato, una brigata di curiosi si avventurò sulla cima della nuova montagna, restando colpiti da un'ultima esplosione. Levittime furono ventiquattro, investite da lanci di scorie e soffocate dalla cenere e dai gas. L'eruzione di Monte Nuovo non fu particolarmente violenta, ma ebbe grande



Figura 2. I prodotti dell’eruzione di Monte Nuovo. A sinistra, le ceneri della prima fase eruttiva in cui si è avuta un’intensa interazione tra magma e acqua. A destra, l’accumulo di scorie scure della fase successiva (foto Scandone).

ripercussione sull’economia e sul tessuto sociale dell’area. Ai danni causati dall’emissione dei prodotti vulcanici si sommarono quelli dei terremoti avvenuti nelle ore precedenti l’apertura della bocca eruttiva. Le ceneri bagnate distrussero buona parte della vegetazione nella zona sottovento (verso Pozzuoli e Napoli): «Dalla parte di Pozzolo ha fatto una montagna alta poco meno di Montemorello ed intorno miglia settanta ha coperto la terra e li arbori di cenere, parte della mia masseria non ho (...) foglia, [la cenere è] alta una corda da trottola, ma vicino a Pozzolo [fino] a miglia sei, non vi è arbore che non abbi troncato tutti e rami nè si conosce che alberi sieno stati che qui è caduta più grossa

ed era molle e sulfurea e pesava» (Del Nero). Inoltre, il cono di Monte Nuovo si formò proprio dove si trovava l’abitato di Tripergole e ne causò la scomparsa, compreso un ospedale, collegato alla presenza di ben 10 bagni termali, anch’essi irrimediabilmente perduti. Il ridimensionamento delle sorgenti termali dell’area flegrea, che davano vita a una fiorente industria medica, si ripercuterà in un vantaggio per gli impianti termali della vicina isola d’Ischia che dura a tutt’oggi. Anche la città di Pozzuoli fu danneggiata dalle pesanti ceneri cadute su strutture già indebolite dai terremoti avvenuti prima dell’eruzione. Un cronista dell’epoca, Francesco Marchesino,

testimonia come a Pozzuoli «non erano dieci case (...) che non fussero o conquassate, o in tutto o in parte a terra rovinate, et senza un cittadino e tale fu lo sconquasso, che nessuna pietra restò al posto, dove l'aveva applicata il mastro muratore». Metà Duomo era crollato e tutti i giardini erano «coperti di cenere».

Solo grazie all'immediata opera di ricostruzione intrapresa dal viceré Pietro di Toledo, la città di Pozzuoli tornò a vivere, pur senza più raggiungere l'importanza che aveva conosciuto nel periodo romano e il livello di vivacità sociale che le avevano regalato per tutto il Medioevo la presenza delle acque termali, dovute alla stessa natura vulcanica del territorio.

Dalle cronache dell'epoca possiamo trarre un insegnamento valido anche per il futuro: l'eruzione fu preceduta da

segnali macroscopici, sia per quello che riguarda la sismicità che le deformazioni del suolo. Tuttavia questi segnali si svilupparono progressivamente nel tempo per oltre cento anni e le persone si abituaron a considerare normale un fenomeno di per sé anomalo. La crisi finale, sebbene preceduta da due anni di scosse di media intensità, accelerò in un tempo breve, meno di ventiquattro ore. I segnali furono talmente rilevanti nelle ore precedenti l'eruzione che tutti gli abitanti di Pozzuoli e Tripergole fuggirono e si salvarono, sebbene non avessero alcuna conoscenza dei fenomeni vulcanici.

Questa esperienza potrebbe essere un'utile guida di comportamento individuale, qualora si dovessero verificare fenomeni analoghi in futuro.

Il bradisismo del 1970

Paolo Gasparini

Il bradisismo del 1970 trovò completamente impreparato il mondo scientifico ed è un classico esempio di crisi la cui gestione è avvenuta in condizioni di grandissima incertezza sul possibile sviluppo del fenomeno. Ne scaturì anche l'affrettato sgombero degli abitanti nel Rione Terra le cui caratteristiche alimentarono il sospetto che l'evacuazione fosse dettata, più che da un reale pericolo, da un tentativo di speculazione edilizia. Il sollevamento continuò fino al 1972, e raggiunse un valore massimo di 170 cm rispetto al 1968. Per gli evacuati dal Rione Terra fu accelerata la costruzione del già progettato Rione Toiano. Le modalità di gestione del bradisismo del 1970 costituiscono un esempio di tutto ciò che non va fatto durante un'emergenza.

Il bradisismo del 1970 è stato un classico esempio di crisi la cui gestione è avvenuta in condizioni di grandissima incertezza sul possibile sviluppo del fenomeno in atto, non solo per le caratteristiche del fenomeno stesso, ma anche per l'assoluta carenza di dati scientifici. Nel 1970 nell'area flegrea non esisteva alcun monitoraggio delle fenomenologie in atto. La stazione sismica più vicina era ubicata nei sotterranei del Convento di San Marcellino, sede dell'Istituto di Fisica Terrestre dell'Università di Napoli. Le ultime misurazioni dei movimenti del suolo estese a tutta l'area risalivano al 1953, quando l'Istituto Geografico Militare aveva effettuato un rilevamento topografico, partendo dalla zona di Piazza Municipio di Napoli, attraversando Pozzuoli ed inoltrandosi nell'area flegrea. I risultati avevano confermato che l'area puteolana era soggetta ad un movimento di subsidenza (bradisismo discendente) con una velocità media di 1,5 cm per anno. Un nuovo rilevamento, effettuato su un tratto limitato della strada costiera Napoli-Pozzuoli nel 1968, aveva confermato la continuazione di questo andamento.

Nei primi mesi del 1970 vennero segnalate numerose lesioni nei muri a secco che proteggevano il percorso della ferrovia cumana e in alcuni edifici del centro storico di Pozzuoli. I pescatori segnalarono diverse evidenze che indicavano un sollevamento del suolo: ad

esempio la differente inclinazione delle passerelle dei traghetti o il sollevamento di un arco nel porticciolo per le barche, sotto il quale i barcaioli da qualche mese potevano transitare stando in piedi sulle loro barche.

In seguito a queste segnalazioni Giovanni Travaglini, Provveditore ai Lavori Pubblici della Campania, dopo aver consultato Giuseppe Imbò, Professore di Fisica Terrestre all'Università di Napoli e Direttore dell'Osservatorio Vesuviano, fece effettuare dai tecnici del Genio Civile un rilievo altimetrico il quale mostrò che il Serapeo si era in effetti sollevato di circa 70 cm rispetto ai valori riscontrati nel 1968. Fu subito effettuato un rilievo lungo il percorso rilevato dall'IGM nel 1953, partendo da un caposaldo ubicato alla Torretta a Napoli. Esso mostrò che l'area sollevata comprendeva l'intero abitato di Pozzuoli e che il massimo sollevamento era avvenuto immediatamente ad oriente del Rione Terra, lungo la costa.

La memoria dei vulcanologi e degli amministratori corse immediatamente agli eventi che precedettero l'eruzione del 1538, unico caso allora riconosciuto di sollevamento del suolo nell'area flegrea.

L'evento trovò completamente impreparato il mondo scientifico. Per moltissimi anni, come anche durante questi primi mesi del sollevamento, il sismografo dell'Istituto di Fisica Terrestre non aveva registrato alcuna attività sismica

attribuibile ai Campi Flegrei. Da poco tempo l'Osservatorio Vesuviano aveva ricevuto dal Ministero della Pubblica Istruzione un significativo finanziamento per incrementare le sue reti di sorveglianza, che utilizzò in gran parte per acquisire dei sismografi Hosaka dello stesso tipo di quelli in funzione per il monitoraggio dei vulcani in Giappone. Immediatamente alcuni di essi furono utilizzati per installare due stazioni a tre componenti: una all'Arcivescovato nel Rione Terra e un'altra al Castello di Baia. Qualche settimana dopo venne installata una terza stazione nella Grotta di Cocceio accanto al lago di Averno. I tecnici del Genio Civile replicarono le misure altimetriche, osservando che il primo marzo il sollevamento del suolo al Serapeo aveva raggiunto i 90 cm rispetto al 1968. Il 3 marzo vi fu un comunicato stampa di Imbò: «I sismografi posti all'Arcivescovato di Pozzuoli hanno registrato in tutta la giornata di domenica nove lievi scosse telluriche con epicentro sul fondo del Golfo di Pozzuoli». Come rilevato dalla stampa e in particolare nelle interviste a diversi abitanti di Pozzuoli riportati da *Il Mattino* nessuna di queste scosse era stata avvertita dalla popolazione.

In base a questo comunicato, il Sindaco di Pozzuoli Angelo Gentile e il Ministro dei Lavori Pubblici Lorenzo Natale informarono la stampa che era necessario mettere in opera uno dei piani di emergenza elaborati nei mesi precedenti, il cosiddetto Piano A, che prevedeva lo sgombero del Rione Terra, in quanto molte delle abitazioni erano già dissestate, mostravano lesioni e si temeva non potessero resistere a possibili scosse sismiche più forti e ad una accelerazione del sollevamento.

Le operazioni di sgombero iniziarono intorno alle 13 tra lo sconcerto degli abitanti, molti dei quali si chiedevano «non abbiamo sentito nulla, non ci siamo accorti di niente, perché non ci

lasciano nelle nostre case?» (*Il Mattino* 3-4 marzo 1970).

Eleonora Puntillo descrisse la situazione su *l'Unità*: «Alle 13 Pozzuoli era in stato di assedio, circa un migliaio tra carabinieri, poliziotti, baschi blu, soldati e polizia stradale hanno circondato la città, bloccando tutte le vie di accesso».

Il blocco improvviso delle vie di accesso impedì a molti puteolani, avvertiti dalle famiglie di quanto stava accadendo, di ritornare tempestivamente in città. La situazione precipitò nel caos. Gli evacuati furono sistemati in un ospedale al Frullone e in alcuni alberghi requisiti all'ultimo momento lungo il litorale domizio, in attesa del futuro Rione Toiano.

La rapidità dell'evacuazione, alcune azioni successive (per esempio il Rione Terra venne murato per impedire il ritorno degli abitanti) e il mancato sgombero di edifici fatiscenti in altre aree della città alimentarono il forte sospetto che l'evacuazione fosse detta, più che da un reale pericolo, da un tentativo di speculazione edilizia.

In effetti le scosse del 3 marzo erano state tanto lievi da essere registrate solo ai sismografi installati da pochi giorni a Pozzuoli, e non a quello nel Convento di San Marcellino, e quindi avrebbero potuto costituire un'attività di fondo normalissima in quell'area. Solo una settimana più tardi i sismografi del Arcivescovato e del Castello di Baia registrarono altre due lievi scosse, che di nuovo non furono avvertite dalla popolazione.

Intanto a Roma Giuseppe Schiavinato, Presidente del Comitato di Geologia del CNR, aveva convocato Giuseppe Imbò, il Presidente dell'Istituto Nazionale di Geofisica Enrico Medi e due dei maggiori vulcanologi di quel tempo, Alfred Rittmann, Direttore dell'Istituto Internazionale di Vulcanologia di Catania, e Giorgio Marinelli, Professore all'Università di Pisa, in una serie di riunioni mol-

IL MATTINO

Quando gli uomini sono tutti fratelli Dovrebbero affacciarsi dal Nostro Terra circa solisti persino - L'attesa è continuata nella notte - Autocarsi dell'Esercito, della Polizia e mezzi dell'Amministrazione

IL MATTINO

IL PROBLEMA DEGLI STRUMENTI PER STUDIARE IL FENOMENO FLEGREO

A Pozzuoli esiste un solo sismografo

Ritardo burocratico per i giapponesi

I DUE SCIENZIATI ARRIVERANNO TRA SABATO E DOMENICA A POZZUOLI

gli studi e porteranno con sé modernissimi apparecchi che sono stati acquistati a Tokio per conto del governo italiano. Uno di essi ha fatto rato all'osservatorio resivano - Rinviate ad oggi la riunione della Commissione del Lavoro Pubblico, prevista per il 10 aprile.

Dura polemica di un famoso vulcanologo francese con gli allarmisti

Né terremoti né eruzioni sono in vista a Pozzuoli

Il professor Tazieff si è trattenuuto alcuni giorni nella città - I risultati dei suoi controlli - Le prime diagnosi affrettate e certi piani di sventramento - Una popolazione ridotta alla metà - Gli aiuti soli sfollati.

Dal nostro invito

POEGLIOLI. 34.
Una nota vede la fine di questo
anno, avrà scaduta già per quel-
lora la sua vigore e potere di
azione. Il suo nome non sarà più
Poggioli, lo dichiarano già i mes-
si. La vediamo che al momento
non ha più potere, ma non
sarebbe vero se non avesse
alcuna altre sorte di
potere. Non ha le basi per un
potere politico, ma di tempo a tempo
avrà qualche

per le violenze sovietiche che questa domenica, in difesa di Sami Tamzil, ed è avvenuta nel laboratorio universitario di cui era responsabile del Cnr a Genova.

Nella sua dichiarazione Tamzil si è difeso dicendo di non aver compiuto alcun reato che lesino nei giornali e dalla Tg. Emanuele che denunciava come questione di diritti la uscita clandestina di un veicolo dal macchinario. Poco dopo che questo veicolo era stato ritrovato in giardino, si è allestito una gara nei Dni, dove tra esso, sia il terrorismo, i giornali fre-
sco d'informazioni addossato a Natale, hanno parlato, a questo che

Il più vicino ed anche questo vicino di mezzo è il *lavoro* del *tempo*, che si manifesta per esempio nella *stessa*, sia pure in modo molto modesto, ma non meno evidente, del *tempo* passato. La *memoria* trae vantaggio dall'arricchimento del *guadagno* e si rivolge ad esse nella stessa veste, mentre affrancata da ogni ostacolo, e mostra più ampiamente la sua *potenza*. Il *tempo* fugge, con valori sempre nuovi, che sono stati già vissuti; per ciò trasmette l'esperienza delle persone, e della storia. Con i suoi valori, il *tempo* è l'elemento di *lavoro*, ma non solo questo.

**Consegna
il memoriale
sulla strage
di Portella
della Ginestra**

**Una fiera
del sesso
nella città
di Christian
Andersen**

卷之三

卷之三



to accese. Vi furono pareri molto diversi sulla possibile evoluzione del fenomeno, ma tutti concordarono sulla necessità di incrementare le reti di monitoraggio. Su proposta di Imbò fu deciso di avvalersi della consulenza di due vulcanologi giapponesi, Takeshi Minakami dell'Earthquake Research Institute e Izumi Yokoyama, della Hokkaido University. Arrivò però solamente Yokoyama, che conosceva il vulcanismo flegreo avendo già trascorso a Napoli un lungo periodo di studio. Imbò si oppose alla proposta di Marinelli di chiedere anche la consulenza di Haroun Tazieff, vulcanologo francese, ma non alla proposta di Schiavonato di installare nei Campi Flegrei la rete sismica gestita dal Laboratorio CNR della Litosfera di Milano, diretto da Roberto Cassinis.

Izumi Yokoyama arrivò il 9 marzo portando un nuovo sismografo. Fu di nuovo Eleonora Puntillo a commentare con lucidità la situazione su *l'Unità* del 13 marzo: «Sono stati chiamati scienziati esteri e costoro si sono trovati di fronte

all'assenza completa di dati, di fronte ad una osservazione scientifica che è iniziata solo pochi giorni fa e con criteri che non sono ben noti e chiari né sono condivisi tra tutti gli scienziati... Ne consegue che le precedenti diagnosi sono state emanate in base a semplici intuizioni... Che non esista ancora la possibilità di una valutazione tecnica lo conferma non solo la continua confusione di dati, ma il fatto che siano stati chiamati scienziati giapponesi come toccasana, facendoli poi trovare di fronte al deserto di valutazioni tecniche serie».

Dopo qualche giorno, anche se non invitato ufficialmente dal CNR, giunse anche Tazieff con una piccola equipe di sismologi, la quale installò una rete di quattro sismografi tra la Solfatara e il Rione Terra. Per circa due settimane i sismografi non registrarono alcuna scossa sismica e Tazieff accusò apertamente Imbò di essersi inventato le registrazioni dei giorni precedenti. Io e alcuni miei colleghi, che fino ad allora

Pozzuoli 8/3/70 (ANSA) Il prof. Imbò indica al prof. Izumi Yokoyama una larga crepa in muro nella zona del porto.



eravamo stati tenuti ai margini del problema, senza che nessuno ci chiedesse un parere, fummo invece coinvolti in pieno da Tazieff che in particolare mi chiese di essere presente a tutti i colloqui che avrebbe avuto con Imbò, per essere sicuro che tra di loro non ci fossero fraintendimenti. Alle ripetute richieste di Tazieff di poter vedere le registrazioni effettuate, con mio grande stupore Imbò rispose che non era autorizzato a mostrarle dato che la consulenza di Tazieff non era stata richiesta. Io avevo visto più volte le registrazioni e sapevo che esistevano, ma non riuscii a convincere Tazieff il quale rimase fermo nella sua convinzione che era stato tutto dettato da un tentativo di speculazione edilizia.

Il sollevamento comunque continuava. Elio Giangreco, Professore alla Facoltà di Ingegneria dell'Università di Napoli, venne incaricato di formare una commissione (nella quale egli coinvolse altri due docenti della stessa Facoltà: Carlo Greco e Arrigo Croce) per organizzare un'indagine ricognitiva sullo stato degli edifici nell'area di Pozzuoli.

Verso la fine del mese di marzo iniziò un'attività sismica più vivace: il 26 marzo si verificò la prima scossa sismica avvertita dalla popolazione, ma che comunque non provocò danni. Nei mesi

successivi le stazioni sismiche del Laboratorio di Geofisica della Litosfera e le tre installate dall'Osservatorio Vesuviano continuarono a registrare sporadici eventi sismici localizzati nel Golfo di Pozzuoli, seppure di piccola intensità. Il sollevamento continuò fino al 1972, e raggiunse un valore massimo di 170 cm rispetto al 1968. Per gli evacuati dal Rione Terra fu accelerata la costruzione del già progettato Rione Toiano.

Per i vulcanologi, napoletani e non, non fu un'esperienza edificante. Al di là dei dati sismici, che evidentemente venivano considerati non rilevanti, il Provveditorato alle Opere Pubbliche e gli altri organi di stato gestivano la crisi in modo autonomo, curando essi stessi la ripetizione dei rilevamenti altimetrici: i contatti con gli enti di ricerca erano tutt'altro che fluidi. Era evidente un reciproco atteggiamento di diffidenza. In conclusione le modalità di gestione del bradisismo del 1970 costituiscono un esempio di tutto ciò che non va fatto durante un'emergenza e che non deve più ripetersi. Fortunatamente negli anni successivi le cose migliorarono notevolmente e le crisi nelle aree vulcaniche italiane sono state poi gestite in modo sempre più appropriato.

Il bradisismo degli anni Ottanta

Giuseppe Luongo

Dopo le crisi degli anni Settanta e Ottanta il 7 settembre 2012 il bradisismo a Pozzuoli si è manifestato con uno sciame sismico di bassa energia. Fenomeno collegato ad un processo di sollevamento del suolo iniziato nel 2005. Dal dicembre del 2012 il livello di allerta dell'area è diventato di "attenzione", livello intermedio per l'evacuazione dell'area all'approssimarsi di un evento eruttivo. Ma le esperienze acquisite sul fenomeno con le crisi del 1970-72 e 1982-85, hanno mostrato che nonostante il notevole sollevamento del suolo e la significativa sismicità dei singoli eventi e della durata degli sciami, il sistema non andò in crisi tale da determinare le condizioni favorevoli a un'eruzione.

Premessa

Negli anni Settanta in Italia la ricerca scientifica nel settore delle Scienze della Terra attraversò una profonda trasformazione sia in termini di contenuto filosofico che organizzativo. A questo cambiamento contribuirono le riflessioni sull'inadeguatezza delle risposte della comunità scientifica e dei Servizi Tecnici in termini di sicurezza delle popolazioni esposte ai fenomeni naturali, come ebbe a registrarsi con il terremoto del Belice del 1968, la crisi sismo-vulcanica (bradisismo) che interessò l'area flegrea nel triennio 1970-72 e l'eruzione dell'Etna nel 1971. A ciò si aggiunse l'affermazione del nuovo paradigma della Tettonica globale alla conclusione degli anni '60. Il nuovo impulso alla conoscenza dei processi geologici venne dato attraverso l'attivazione di Progetti Finalizzati del CNR, ai quali parteciparono istituti universitari ed Enti di Ricerca. In particolare i settori sismologico e vulcanologico finalizzarono i loro obiettivi alla mitigazione del rischio, attraverso il potenziamento delle reti di monitoraggio e la valutazione della pericolosità sismica e vulcanica di lungo periodo. La nuova organizzazione venne messa alla prova con il terremoto del Friuli del 1976 e, ancor più, con il terremoto della Campania-Basilicata del 1980. Così quando nel 1982 si manifestò una nuova crisi

bradisistica nell'area flegrea, le strutture di ricerca ed in particolare l'Osservatorio Vesuviano erano ben preparate ad affrontarla.

Il 23 novembre 1980 un forte terremoto ($M_L = 6,8$), localizzato nell'Appennino Meridionale, produsse effetti disastrosi nelle regioni Campania, Basilicata e Puglia; la stessa città di Napoli subì gravi danni. La stampa pose attenzione anche al Vesuvio e in un articolo apparso in quei giorni si affermò che il vulcano doveva ritenersi "ferito a morte", sintetizzando, con tali parole, l'ipotesi avanzata da un vulcanologo che le onde sismiche generate dal terremoto nell'Appennino avrebbero potuto innescare un processo eruttivo. In quel tempo chi scrive aveva la responsabilità sia dell'intervento scientifico nelle regioni disastrate dal terremoto che del monitoraggio e mitigazione del rischio vulcanico dei vulcani attivi italiani, facenti entrambi capo al Progetto Finalizzato Geodinamica del CNR. Per evitare che il mio silenzio potesse essere interpretato come condivisione di tale interpretazione del fenomeno e facesse nascere un pericoloso tormentone sull'approssimarsi di un'eruzione al Vesuvio, esternai la mia ipotesi. In buona sostanza affermai che l'energia sismica che aveva investito il Vesuvio era trascurabile e quindi largamente al di sotto del valore necessario ad innescare un evento eruttivo. Tuttavia non fu trascurata l'ipotesi che il mo-

tore che aveva generato il sisma fosse da collocare nel contesto geodinamico dell'apertura del Bacino Tirrenico e formazione della Catena Appenninica, processo dal quale non sono esclusi i vulcani dell'area napoletana. In breve i terremoti dell'Appennino e le eruzioni nell'area napoletana sarebbero manifestazioni diverse degli stessi processi tettonici agenti a scala regionale.

Cronistoria della crisi

La crisi bradisismica del 1982-85 iniziò nell'estate del 1982, quando si registrò nell'area flegrea un innalzamento del suolo ritenuto anomalo rispetto ai dati acquisiti sul fenomeno a partire dalla chiusura della precedente crisi del 1970-72. Dopo questo ultimo evento la rete di monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano nell'area era stata notevolmente potenziata e dieci anni di osservazioni avevano mostrato che nell'area si registravano oscillazioni del moto del suolo di piccola ampiezza, con periodicità annuale. Così il sollevamento dell'estate del 1982 non destò allarme. Solo dopo alcuni mesi fu chiaro che si trattava del segnale di una nuova crisi. Il primo intervento della Protezione Civile a Pozzuoli avvenne il 31 gennaio 1983 con una visita ufficiale in città dell'allora ministro Loris Fortuna. Questa visita era stata programmata dopo una riunione ristretta a pochi tecnici al Dipartimento della Protezione Civile. Fortuna, da poco ministro, era interessato a prendere contatto con la realtà del proprio ufficio ed in particolare voleva, di persona, rendersi conto dei rischi connessi all'attività dei vulcani. Si scelse Pozzuoli come prima tappa del suo viaggio sui vulcani perché tra tutte le aree attive quella flegrea poneva problemi di maggiore rilevanza in caso di intensificazione dell'attività. Si deve a Loris Fortuna la costituzione in quei

mesi del Gruppo Nazionale di Vulcanologia del CNR perché si continuasse l'attività svolta nel settore vulcanico dal Progetto Geodinamica, concluso nel 1981. Questo Gruppo si sarebbe dimostrato un utile strumento operativo per la Protezione Civile nella lunga crisi del bradisismo.

Parecchi mesi dopo l'inizio della ripresa del sollevamento, nell'area si registrò uno sciame sismico che fu avvertito dalla popolazione in un'area ristretta. Tuttavia la sismicità divenne significativa solo a partire dalla primavera del 1983, dopo un evento di Magnitudo 3,5, localizzato alla Solfatara, ed avvertito distintamente in una vasta area comprendente la zona occidentale della città di Napoli. Da quel momento gli edifici del centro antico di Pozzuoli furono sottoposti a continue sollecitazioni sismiche sia con eventi di piccola energia, ma molto frequenti, che con eventi più isolati di energia significativamente più elevata. Mentre i primi erano avvertiti in un raggio di pochi chilometri, l'effetto dei secondi si manifestava in una zona più ampia di raggio di qualche decina di chilometri. Nel mentre, in piena estate, il ministro Fortuna venne sostituito dal collega Enzo Scotti.

Un incremento significativo dell'attività sismica si registrò il 4 settembre quando si verificarono numerosi eventi sismici con la caratteristica distribuzione a sciami. Tali eventi produssero panico nella popolazione della parte bassa della città di Pozzuoli che abbandonò le abitazioni trovando temporaneamente riparo in autobus sul lungomare. Il 4 ottobre 1983 alle ore 08:10 circa si verificò un terremoto di Magnitudo 4,0 con epicentro nei pressi della Solfatara e profondità compresa tra 2,5 e 3,0 km. L'evento produsse danni e panico nella città di Pozzuoli, ma anche le zone circostanti subirono uno scuotimento mai verificatosi dall'inizio della crisi. L'area di "avvertibilità" del terremoto ebbe un

raggio superiore a 30 km. Subito dopo l'evento furono avviate le osservazioni sugli effetti seguendo due metodi: valutazione dell'intensità nell'area epicentrale con analisi dei danni agli edifici e valutazione dell'intensità nel campo lontano mediante l'analisi delle risposte da parte della popolazione ad un questionario, distribuito all'indomani del terremoto, relativo alle sensazioni avvertite durante il sisma. Al questionario risposero 13000 persone per 75 località, fornendo informazioni sulla città di Napoli con un dettaglio fino ad allora mai raggiunto. L'intensità nell'area epicentrale risultò del VII grado della scala MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg), mentre nella parte occidentale della città di Napoli risultò del VI grado. La Magnitudo del terremoto mostrò senza ombra di dubbio che il rischio sismico aveva raggiunto un livello troppo elevato per una parte della città di Pozzuoli per poter garantire l'incolumità dei residenti. I responsabili della sorveglianza dell'area ritinnero opportuno segnalare al ministro Scotti che: a) il livello di sismicità cresceva unitamente alla velocità del sollevamento del suolo; b) il terremoto del 4 ottobre aveva raggiunto una Magnitudo molto prossima al valore massimo atteso (Magnitudo 4,5); c) il terremoto del 4 ottobre avrebbe potuto raggiungere un'intensità dell'VIII grado e produrre crolli se avesse avuto una minore profondità ipocentrale; d) molti edifici dell'area epicentrale erano fatiscenti ed avevano già subito danni in seguito al terremoto del 23 novembre 1980 in Irpinia. Il Ministro convocò immediatamente a Napoli, in Prefettura, gli amministratori dell'area flegrea, della città di Napoli, delle Province della Campania, della Regione, i tecnici della Protezione Civile, le forze dell'ordine e i rappresentanti della parti sociali per attivare le azioni di protezione civile necessarie per la sicurezza della popolazione esposta. In quella sede

i responsabili della sorveglianza del bradisismo del Gruppo Nazionale per la Vulcanologia, al quale afferiva l'Osservatorio Vesuviano, presentarono la Mappa di Pericolosità Sismica dell'Area Flegrea e consegnarono al Ministro e al Prefetto Boccia una relazione riservata. Dai documenti trasmessi alle autorità di Protezione Civile il centro antico di Pozzuoli risultava ad elevata pericolosità sismica, in quanto in quell'area era alta la probabilità di accadimento di eventi sismici di Magnitudo pari o superiori a quella dell'evento del 4 ottobre. In queste condizioni era necessario individuare ed abbandonare gli edifici in condizioni statiche inadeguate a sopportare le sollecitazioni sismiche attese. Purtroppo per la mancanza al momento di un quadro attendibile della vulnerabilità degli edifici, fu decisa l'evacuazione di tutta l'area a più elevata pericolosità. Gli esperti suggerirono altresì che la popolazione da allontanare dal centro antico non fosse collocata lungo la fascia costiera da Arco Felice a Miseno, in quanto si temeva una possibile migrazione dell'attività sismica nella parte occidentale del Golfo di Pozzuoli.

Da un sommario conteggio risultò che la popolazione da evacuare, a causa del rischio sismico, era di circa 30.000 unità. Nella pianificazione di tale intervento fu messo anche in bilancio che il fenomeno potesse evolversi verso un'eruzione, producendo un'ulteriore carenza di alloggi nel centro antico. In un tale scenario il Ministro ipotizzò di affrontare il problema della sistemazione della popolazione da evacuare, con la costruzione di un nuovo insediamento, saltando la fase dell'uso temporaneo dei container e dei prefabbricati leggeri. Gli Amministratori di Pozzuoli mostrarono la loro titubanza alla proposta del Ministro; in essi emerse il conflitto tra il voler conservare inalterato l'assetto urbano di Pozzuoli senza migrazioni in massa della popo-

lazione e l'allettante ipotesi di poter disporre di alcune migliaia di alloggi. Il nodo fu sciolto secondo le linee tracciate dal Ministro e la scelta del sito cadde su Monte Rusciello, considerata l'area a più basso rischio sismico del Comune di Pozzuoli, dove si sarebbero costruiti 5000 alloggi.

La riunione fiume indetta dal ministro Scotti si concluse con la decisione dell'evacuazione e della realizzazione di un nuovo insediamento a Monte Rusciello, ma non fu indicato chi tra le autorità competenti, Ministro, Prefetto, Sindaco, avrebbe dovuto comunicare tale decisione alla popolazione interessata. Si temporeggiò per la grave responsabilità delle misure da prendere per affrontare l'evacuazione di 30.000 persone. Intanto le notizie sui risultati della riunione in Prefettura circolarono in modo difforme con scenari apocalittici su quanto sarebbe accaduto nell'area flegrea. Nella notte tra il 10 e 11 ottobre si diffuse la notizia che un terremoto di elevata energia era previsto per l'indomani mattina. Tutta l'area flegrea e la città di Napoli furono investite da una psicosi collettiva da fine del mondo.

Il giorno 11 ottobre il Sindaco della città di Pozzuoli con un manifesto invitò i cittadini ad abbandonare la zona del centro antico di Pozzuoli. Non mancarono le polemiche sulla decisione, ma la cittadinanza era preparata ad una tale scelta delle autorità, e così iniziò lo svuotamento di Pozzuoli ed il travaso dei cittadini verso i villaggi turistici del litorale domizio. Nonostante la gravità della situazione non furono definiti in modo chiaro i ruoli del Dipartimento della Protezione Civile, della Prefettura, della Regione e del Comune di Pozzuoli. Per l'intervento scientifico il Ministro assegnò al Gruppo Nazionale di Vulcanologia del CNR il ruolo di consulente e finanziò il potenziamento delle attività di monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano nell'area flegrea.

Parteciparono a questa attività numerosi istituti universitari, del CNR, ed extrauniversitari per la copertura di tutti i settori necessari per una sorveglianza ad alto livello. Il coordinamento degli interventi fu affidato all'Osservatorio Vesuviano. Si stabilì un rapporto intenso tra struttura di sorveglianza e Prefettura di Napoli per aggiornare continuamente la Protezione Civile sull'evolversi del bradisismo. In Prefettura venivano trasmessi due comunicati al giorno e settimanalmente si svolgeva una riunione per fare il punto sul fenomeno del bradisismo. Nei momenti di crisi più acuta si intensificarono comunicati e riunioni. Un rapporto tecnico era trasmesso con periodicità settimanale ad autorità, enti, istituti, fabbriche. La comunità scientifica internazionale era informata sull'evoluzione del bradisismo attraverso i rapporti periodici inviati al Bollettino della Smithsonian Institution.

L'evacuazione consentì di affrontare con più tranquillità l'evoluzione del fenomeno, ma non mancarono sussulti che lasciarono il segno in una popolazione già provata. Il punto più alto della crisi dopo l'evento del 4 ottobre 1983 si raggiunse il 1º aprile 1984 quando uno sciame sismico iniziato intorno alle ore 3 si sviluppò con vari picchi fino al mattino inoltrato. Il suolo era scosso quasi senza soluzione di continuità; alle vibrazioni di una scossa si sovrapponevano le vibrazioni prodotte dalla successiva. Questo fenomeno durò ore, superando in durata ed energia gli sciami precedentemente registrati. Si trattava di un fenomeno con caratteristiche diverse da quelle sperimentate e lasciava temere che il sistema potesse entrare in crisi con la propagazione di fratture, attraverso le quali il magma avrebbe potuto risalire fino alla superficie. Questa crisi fu seguita momento per momento al Centro di monitoraggio del Rione Toiano a Pozzuoli da chi scrive questa

nota, dai tecnici del Centro e da un collega vulcanologo. Il Centro era aperto ai cittadini, che numerosi erano presenti. Infondemmo sicurezza ai presenti con il nostro lavoro senza che potessero trapelare differenze di opinioni sul da farsi e sullo stato di pericolosità. In verità il collega mi sollecitava perché lanciassi l'allarme per l'approssimarsi dell'eruzione mentre tentavo di dimostrarigli che il fenomeno mostrava segni di stanchezza e che si sarebbe esaurito senza produrre le condizioni da lui temute.

Dopo la crisi sismica del 1º aprile che, secondo alcuni studiosi, avrebbe potuto evolversi verso una fase pre-eruttiva, il Ministro Zamberletti, che aveva sostituito il dimissionario onorevole Scotti, dette impulso alla preparazione di piani di evacuazione in caso di evento eruttivo. Il Ministro con un'ordinanza, affidò al direttore dell'Osservatorio Vesuviano il compito di trasmettere con un congruo anticipo al Ministro l'allarme per l'approssimarsi di un evento eruttivo. Questa scelta di Zamberletti era tesa a bloccare sul nascere le polemiche che frequentemente si generavano, alimentate da voci sull'imminenza di un evento catastrofico nell'area flegrea.

Facendo seguito alle disposizioni del Ministro la comunità scientifica elaborò gli scenari per i piani di evacuazione. La storia vulcanica dei Campi Flegrei indicava come evento probabile di bassa energia un'eruzione tipo quella di Monte Nuovo del 1538 ma non poteva essere trascurata la probabilità dell'accadimento di un evento esplosivo di elevata energia, come quello verificatosi nella Conca di Agnano circa 4000 anni fa. Per i due tipi di eruzione fu realizzata una zonazione della pericolosità, individuando quattro zone a diversa pericolosità. Definiti gli scenari si individuarono, sulla base dei fenomeni che si erano registrati nel corso della crisi, le aree di probabile apertura di bocche eruttive, localizzate nei dintorni

del centro antico di Pozzuoli. Sulla base dello scenario dell'eruzione di maggiore energia, si dedusse infine che l'area da evacuare prima dell'evento eruttivo aveva un raggio di 4-5 km con centro in Pozzuoli.

Il Piano di evacuazione fu predisposto e furono preparati gli opuscoletti che illustravano il Piano da distribuire alla popolazione che avrebbe dovuto essere allontanata dall'area pericolosa. Questi non furono mai distribuiti perché nel frattempo, durante gli ultimi mesi del 1984, il fenomeno diminuì di intensità. La crisi sismica si chiuse con l'evento dell'8 dicembre di Magnitudo 3,8 in piena sintonia con il sollevamento che nello stesso tempo tendeva ad arrestarsi.

Note in margine alla crisi

- Per avere un quadro esauriente delle problematiche di Protezione Civile nell'area Flegrea durante la crisi bradisismica del 1982-85, fu necessario registrare la presenza di infrastrutture, attività produttive, insediamenti militari, strutture ospedaliere, e scuole nell'area ad elevata pericolosità. In particolare: le linee ferroviarie della Cumana, Circumflegrea e le Ferrovie dello Stato che attraversavano da nord a sud e da est ad ovest l'area flegrea. I treni della Cumana e delle Ferrovie dello Stato che transitavano per la parte più pericolosa della caldera flegrea, mentre la Circumflegrea sviluppava il suo percorso in una fascia ai margini di tale zona; Le fabbriche della SOFER e della PIRELLI collocate nella zona più pericolosa; Insediamenti militari sono localizzati a Nisida (NATO), ad Agnano (US NAVY), a Bagnoli (Quartiere Generale della NATO per il SE Europa); l'Accademia Aeronautica di Pozzuoli nei pressi del cratere della Solfatara.

- Per realizzare un canale di comunicazione trasparente tra comunità scientifica responsabile della sorveglianza nell'area flegrea e popolazione esposta al rischio, fu attivato un centro di monitoraggio al Rione Toriano ad Arco Felice aperto al pubblico, gestito dal personale del Comune di Pozzuoli, addestrato a tale attività. Tale struttura fungeva da punta avanzata del Centro di Sorveglianza dell'Osservatorio Vesuviano, collocato prima all'Università di Napoli nel complesso di San Marcellino e poi sulla collina di Posillipo.
- Fin dai primi segnali della crisi la popolazione fu informata sull'attività che si registrava (microterremoti, sollevamento del suolo, incremento dell'attività fumarolica) attraverso comunicati alle autorità competenti e alla stampa, dibattiti televisivi, seminari nelle scuole, incontri nelle fabbriche e in strada. La stampa svolse un ottimo lavoro diffondendo informazioni sul fenomeno molto puntuali e realiste, ed evitando rappresentazioni catastrofiche.
- Anche il dibattito scientifico tra le istituzioni impegnate con la Protezione Civile sul fronte della mitigazione del rischio e quelle che sviluppavano ricerche sull'interpretazione del fenomeno si realizzò nella massima trasparenza perché si ritenne che, in momenti così delicati per la sicurezza della comunità esposta, tutti avrebbero potuto dare un contributo utile al buon esito degli interventi della Protezione Civile. Questa scelta sebbene producesse confronti anche molto forti tra le parti coinvolte, risultò molto positiva a quanti avevano il compito di valutare il livello di pericolosità dell'area e la sua evoluzione. Si può ritenere che il buon esito della crisi bradisismica in quegli anni fu in buona parte dovuta alla scelta dei responsabili di non operare in regime di monopolio scientifico.
- Attraverso un accordo tra i sindacati e i responsabili della sorveglianza dell'area flegrea si convenne di continuare l'anno scolastico a Pozzuoli, dopo l'evacuazione, negli edifici scolastici strutturalmente idonei per resistere alle sollecitazioni sismiche attese nell'area flegrea.
- L'incremento delle emissioni di CO₂ alla Solfatara sollevò il problema della sicurezza del campeggio posto nel cratere, per l'eventuale accumulo di tale gas nello strato atmosferico prossimo al suolo che avrebbe potuto rendere irrespirabile l'aria ai campeggiatori distesi sui giacigli durante la notte. Si decise di non procedere alla chiusura del campeggio, perché tale decisione avrebbe avuto un impatto estremamente negativo sulla comunità puteolana e nella vicina città di Napoli, ma di potenziare il monitoraggio del flusso dei gas e realizzare un più efficace sistema di allarme.
- Per tranquillizzare le famiglie dei giovani allievi dell'Accademia Aeronautica di Pozzuoli, i responsabili della sorveglianza dell'area tennero frequenti incontri e seminari sugli sviluppi della crisi bradisismica.
- Il Comando US NAVY invitò nella sede della base in Via Scarfoglio ad Agnano i responsabili della sorveglianza dell'area flegrea per conoscere il livello di pericolosità del sito. Chi scrive questa nota espose le sue valutazioni in merito alla pericolosità e alla possibile evoluzione del fenomeno ma poiché gli erano ignote le attività svolte in quella sede, in quanto oggetto di segreto militare, invitò i responsabili a contattare il Servizio Geologico degli Stati Uniti al quale si sarebbe fornita collaborazione per la sicurezza di quanti vi operavano. Così dagli Stati Uniti fu inviata una commissione di esperti con a capo

- David P. Hill a quel tempo impegnato nel monitoraggio della Caldera di Long Valley in California, dove si registrava una robusta sismicità e un lento sollevamento del suolo, fenomeno molto simile alla crisi rilevata nei Campi Flegrei.
- Nella carta di pericolosità sismica, presentata in Prefettura il 4 ottobre del 1983 in seguito al terremoto di $M_L = 4,0$, la zona a più elevata pericolosità era suddivisa in due parti indicate come Zona A e Zona A'. Nella Zona A ricadeva tutto il centro abitato antico di Pozzuoli, dalla Solfatara al mare, che sarebbe stato interessato dall'evacuazione, mentre la Zona A', dove era collocato un insediamento produttivo rilevante per la città di Pozzuoli, fu ritenuta a più basso rischio in quanto nelle fabbriche l'evacuazione avrebbe potuto realizzarsi in tempi brevi e con successo tenuto conto della organizzazione e della preparazione delle maestranze all'evento.
 - Nel settembre 1984 chi scrive questa nota ebbe un intenso confronto con John Guest, vulcanologo britannico e consulente della Comunità del Regno Unito a Napoli, che si dichiarava preoccupato per una possibile imminente eruzione nell'area flegrea. La risposta fu di decisa smentita basata su un chiaro decremento del fenomeno osservato a partire dalla fine della primavera.
 - Una Commissione di esperti giapponesi sulla gestione delle catastrofi naturali raggiunse Napoli per studiare il positivo rapporto che si era instaurato tra scienziati, giornalisti, autorità e popolazione esposta, durante la crisi bradisismica, evento ritenuto eccezionale per la complessità dei rapporti e la diversità delle funzioni tra la domanda di maggiore sicurezza della comunità e la capacità di risposta dei decisori.
 - Haroun Tazieff, accompagnato da chi scrive, visitò i luoghi del bradisismo

Figura. Sabato 11 marzo 1989. Visita di Haroun Tazieff alla Solfatara di Pozzuoli. Al centro dell'immagine Haroun Tazieff, in primo piano a sinistra Dario Tedesco, in secondo piano a sinistra Giuseppe Luongo, a destra Franco Mancusi.



nel marzo 1989 e il giornalista Franco Mancusi registrò l'avvenimento con un'intera pagina del giornale *Il Mattino*. Tazieff in quell'occasione espresse un giudizio molto positivo sulla gestione della crisi del 1982-85, così diverso da quello critico espresso nel 1970, quando considerò l'intervento una farsa per coprire una odiosa speculazione.

Considerazioni sulla “previsione dell’evento”

È significativo ricordare anche che il paradigma sulla previsione delle eruzioni e i modelli approntati per la previsione di un tale evento, attraverso l'analisi dei fenomeni precursori (terremoti, deformazioni del suolo, incremento dell'attività fumaroliche, ecc.), indicavano che il sistema si stava preparando per un evento eruttivo. La realtà sconfessò i modelli che si mostrarono inadeguati per quanto stava accadendo nell'area flegrea. Questo risultato è un monito a quanti hanno il compito del monitoraggio dell'area flegrea affinché si impegnino a potenziare le ricerche sulla genesi del fenomeno e sulla sua evoluzione fino all'evento eruttivo. In buona sostanza bisogna non solo misurare con maggiore precisione i parametri noti che precedono un evento eruttivo ma bisogna puntare a un nuovo paradigma che risponda con maggiore attendibilità alla comprensione di un fenomeno complesso come un'eruzione. Infatti la complessità di un sistema vulcanico non dipende dal numero delle cause che lo governano ma essenzialmente dalla loro interconnessione e dai relativi processi di feedback. L'intero sistema raggiunge maggiore valenza rispetto alla somma delle sue parti per cui esso si comporta in modo non lineare. Processi dinamici non lineari non possono essere descritti adeguatamente da modelli determini-

stici. Inoltre si deve porre attenzione al fatto che non tutti i dati registrati in un'area vulcanica attiva forniscono lo stesso livello di conoscenza del fenomeno in atto e quindi non hanno lo stesso peso nella valutazione del livello di pericolosità. Per queste condizioni, dovute allo sviluppo storico dei settori scientifici interessati per lo studio e monitoraggio del fenomeno bradisismico, la sismicità e le deformazioni del suolo sono i settori che al momento forniscono il quadro fenomenologico più attendibile.

Come si diceva, il sistema vulcanico è un sistema non lineare, fortemente influenzato dalle condizioni iniziali e segue comportamenti caotici. Così per i Campi Flegrei si sono aperte nuove linee di ricerca proprio per superare le difficoltà nel rappresentare un sistema complesso. È la teoria del caos deterministico che consente di analizzare questi comportamenti. Il sollevamento e l'abbassamento dei Campi Flegrei può essere dovuto alla dinamica interna del sistema e non richiede necessariamente una spinta associata alla risalita di magma. L'intera storia vulcanica dei Campi Flegrei con i suoi eventi estremi, a partire dalla grande eruzione dell'Ignimbrite Campana (39.000 anni fa), alle eruzioni più recenti, fino a quella storica di Monte Nuovo (1538) e alle crisi bradisistiche degli anni Settanta e Ottanta, può essere associata a processi convettivi del magma a diverse scale spaziali e temporali, dovuti a differenze di temperatura che a loro volta producono condizioni di instabilità gravitazionale. Tali condizioni sono rappresentate da note equazioni; la cui soluzione numerica sintetizza bene il comportamento caotico di un processo convettivo. Infine, la scoperta che la distribuzione degli eventi eruttivi è rappresentata da leggi di potenza indica che il sistema è in uno stato critico autorganizzato. Tali leggi evidenziano che il sistema tende a libe-

rare energia con un elevato numero di eventi di bassa energia, con un minor numero di eventi di media energia e pochi eventi di energia molto elevata. Da questa legge potrebbe discendere che l'evento più probabile è di bassa energia. Tuttavia il sistema non segue una legge temporale che mette in successione gli eventi di minore energia seguiti da quelli di media energia fino a quelli di alta energia secondo le loro frequenze di accadimento. Tutto ciò mette in difficoltà quanti hanno il compito di prevedere un evento di alta energia potenzialmente catastrofico. In buona sostanza, quindi, la maggiore probabilità di accadimento non assicura che l'evento che accadrà sia quello di minore energia. In tal caso il prossimo evento atteso potrebbe avere parimenti bassa o elevata energia. Solo l'introduzione di altri vincoli nell'analisi dello stato del vulcano potrebbe limitare l'incertezza sulla valutazione del meccanismo eruttivo e sulla sua energia.

... E domani?

Il 7 settembre 2012 il bradisismo a Pozzuoli si è manifestato con uno sciame sismico di bassa energia, con alcuni eventi avvertiti nell'area epicentrale localizzata tra il centro storico di Pozzuoli ed Arco Felice. Il comunicato emesso dall'Osservatorio Vesuviano ha evidenziato che tale sciame non è stato un fenomeno isolato, bensì collegato ad un processo più ampio che interessa l'area flegrea. Infatti, è stato rilevato un sollevamento del suolo a partire dal 2005, per un totale di 18 cm circa, prima lento e poi più veloce nei mesi precedenti la successione dei microterremoti, ed un incremento dei flussi di gas alla Solfatara e a Pisciarelli, nella Conca di Agnano. Il Dipartimento della Protezione Civile, sulla base di questi dati e dopo alcuni incontri con le amministrazioni locali e con l'Assessorato alla Protezione Civile

della Regione Campania, nel mese di dicembre del 2012 ha portato il livello di allerta da quello iniziale di "base" a quello di "attenzione", secondo livello su una scala di quattro. Si potrebbe dire che la prudenza non è mai troppo! Ma con tale prudenza non si utilizzano le esperienze già acquisite sul fenomeno con le due crisi del 1970-72 e 1982-85, durante le quali il fenomeno aveva raggiunto livelli di pericolosità di gran lunga superiore a quello attuale, e durante le quali la comunità puteolana aveva sopportato prima l'evacuazione del Rione Terra e poi l'evacuazione del centro antico storico della città. A queste evacuazioni seguirono interventi urbanistici sul territorio comunale molto invasivi con la realizzazione del Rione Toiano e del più ampio insediamento di Monte Rusciello. Le due crisi hanno mostrato che, nonostante il notevole sollevamento del suolo (in ogni crisi il suolo si è sollevato fino a 1,8 m nell'area del Porto di Pozzuoli) e la significativa sismicità in termini di energia sismica dei singoli eventi e della durata degli sciami, il sistema non è andato in crisi tale da determinare le condizioni favorevoli a un'eruzione.

Pertanto, nell'interpretazione del fenomeno in atto e nella ricerca sulla genesi delle crisi bradisismiche dell'area flegrea, bisogna porre attenzione a non cadere in salti logici che possano rendere ancora più nebulosa la comprensione del quadro fenomenologico. Particolare rilevanza va posta nella valutazione dell'energia dei processi che si manifestano durante le crisi, come la sismicità e le deformazioni del suolo. Più autori hanno associato le crisi bradisismiche al degassamento del magma senza indicare a quale causa primaria attribuire tale processo, rilevando altresì che l'energia termica rilasciata dai fluidi del campo fumarolico della Solfatara (e.g. Chiodini et al., 2010, circa 100 MW associata ad un'emissione totale

di circa 5.000 td^{-1} di una miscela di gas $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$)¹ è superiore all'energia libera dalla sismicità, dalle deformazioni del suolo e dal flusso di calore conduttivo. In realtà l'energia rilasciata dai sismi durante la crisi del 1982-85 risulta almeno un ordine di grandezza superiore a quella rilasciata dai fluidi alla Solfatara nel corso della recente crisi, normalizzando i dati per l'intervallo di un anno; e per di più l'energia associata alle deformazioni del suolo risulta 5 ordini di grandezza superiore. Da tutto ciò discende che le crisi bradisismiche non possono essere attribuite all'energia dei fluidi del campo geotermico in quanto questa è inferiore all'energia dei processi che avrebbe dovuto generare (sismicità e deformazione del suolo). Si tenga presente che, se si estendesse il

fenomeno rilevato alla Solfatara a tutta la caldera, l'energia rilasciata dai fluidi aumenterebbe di 2 ordini di grandezza, ma risulterebbe ancora inferiore di 2-3 ordini di grandezza all'energia spesa per la deformazione del suolo. In buona sostanza il problema della genesi delle crisi bradisismiche non potrà trovare una soluzione soddisfacente fino a quando sarà analizzato come un processo lineare, in quanto il sistema è complesso e si comporta in modo non lineare. È opportuno rilevare che la complessità del sistema vulcanico non dipende solo dal numero delle cause che lo governano bensì essenzialmente dalle loro interazioni e dai relativi processi di feedback.

¹ G. Chiodini, S. Caliro, C. Cardellini, D. Granieri, R. Avino, A. Baldini, M. Donnini, C. Minopoli. Long-term variations of the CampiFlegrei, Italy, volcanic system as revealed by the monitoring of hydrothermal activity. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, B03205, doi: 10.1029/2008JB006258, 2010.

La comunicazione nei giorni del bradisismo

Franco Mancusi

Contrariamente a quanto avvenuto dieci anni prima, per il bradisismo dell'82-84 fu creato un sistema di comunicazione più efficiente, in grado di rispondere ai bisogni degli abitanti flegrei nei momenti difficili dell'emergenza.

In tal modo fu assicurato un vero e proprio filo diretto (precursore della rete di sorveglianza dei nostri giorni) in grado di assistere la popolazione giorno e notte e di seguire l'evoluzione dei fenomeni momento per momento.

Quando le barche s'incagliavano sugli scogli dell'antica darsena di Pozzuoli, i pescatori davano l'allarme anticipando le preoccupazioni dei bollettini ufficiali. Era in arrivo qualche scossa più forte, perché sui fondali rigonfiati del porto non era più possibile navigare. E la terra ballerina flegrea, puntualmente, si faceva ancora sentire con i suoi effetti devastanti. Quattro o cinque centimetri di sollevamento nel giro di pochi giorni, improvvisamente i boati e gli sciami sismici che rimettevano in gioco la pazienza e la resistenza della popolazione. L'emergenza del bradisismo: una guerra combattuta anche sul piano dei nervi. Due anni intensi, dalla fine del 1982 all'autunno del 1984, vissuti però attraverso un rapporto sempre più stretto tra comunità scientifica, amministrazioni locali, cittadinanza. Una sintesi che valse certamente ad evitare il peggio nella difficile gestione dei fenomeni vulcanici flegrei. Niente di paragonabile con i giorni del caos che avevano provocato dodici anni prima, nel marzo 1970, la fuga in massa dal mitico Rione Terra, emblema storico dei Campi famosi in tutto il mondo.

Una brutta parentesi, quella degli anni Settanta. Il comprensorio puteolano fu colpito a sorpresa dalle prime scosse, leggere ma insistenti. Priva di conoscenza e di strutture scientifiche adeguate, la città fu stravolta dal terrore. Dopo sei forti scosse consecutive, la paura prese

il sopravvento, dalla zona dall'epicentro della Solfatara alle periferie. Impaurita per l'arrivo di una imminente catastrofe, la gente scappò in ogni direzione. Poi l'esodo forzato con i camion militari, poche masserizie, qualche materasso e via, un colpo mortale per il centro storico. Confusione ed approssimazione, dunque. Negli anni successivi la devastazione totale. Persino i marmi della cattedrale barocca furono saccheggiati, come tutte le case e le botteghe dell'antico borgo dei pescatori. Pozzuoli diventò una città fantasma.

Negli anni Ottanta, invece, la crisi fu affrontata con una diversa consapevolezza. Vulcanologi, rappresentanti delle istituzioni, operatori dell'informazione riuscirono a far conoscere meglio la difficile realtà dei fenomeni, coinvolgendo la comunità locale sui diversi problemi dell'emergenza. Fu creato un sistema di comunicazione più efficiente, in grado di rispondere ai bisogni degli abitanti flegrei nei momenti difficili dell'emergenza, assicurando un vero e proprio filo diretto (precursore della rete di sorveglianza dei nostri giorni) in grado di assistere la popolazione giorno e notte, di seguire l'evoluzione dei fenomeni momento per momento. Un presidio informativo puntualissimo, allestito in una scuola del periferico Rione Toiano, grazie alla disponibilità dell'Osservatorio Vesuviano e all'impegno di molti giovani ricercatori e impiegati comunali. Di volta in volta gruppi di studiosi guidati



Pozzuoli, Serapeo.

dal direttore dell'Osservatorio, Giuseppe Luongo, dal professor Paolo Gasparini, da altri rappresentanti della comunità scientifica si spostavano nelle località più colpite dalle infernali sequenze sismiche per illustrare i dettagli della crisi in atto nell'area flegrea e rispondere alle moltissime domande della gente. Il ritmo incalzante delle conferenze-stampa, inoltre, valse a limitare i danni dei facili sensazionalismi e, soprattutto, delle notizie sballate.

Un modello decisamente positivo, insomma, nonostante i disagi e la paura. A Pozzuoli, negli anni Ottanta, fu sperimentata la prima, autentica operazione di protezione civile del nostro territorio nazionale. E alla fine dalla doppia emergenza del bradisismo si uscì senza alcuna vittima, anche se con un prezzo altissimo in termini sociali. L'intero borgo dei pescatori (tremila persone) definitivamente sradicato dal Rione Terra nel 1970. Tredici anni dopo, ventimila abitanti del centro antico costretti a trasferirsi nel nuovo mega-quartiere di Monterusciello, costruito in pochi mesi in una zona periferica sui bordi della caldera vulcanica. Ma le vicende del bradisismo sono antichissime, risalgono ai

momenti nevralgici della storia. Su tre colonne del Serapèo romano il vulcano aveva lasciato la sua impronta. Nel marmo di quelle tre splendide colonne (le ultime rimaste in piedi, nel fastoso mercato pubblico costruito dai Flavi nel primo secolo dopo Cristo) erano rimasti incisi, in caratteri indelebili, i segni del moto lentissimo di sprofondamento e delle fasi di risalita della storia di Pozzuoli. Scavando fra i resti di quel monumento antico, fu Carlo di Borbone ad accorgersi che i tre artistici blocchi erano rimasti a lungo sotto il mare. Lo provavano le incrostazioni, fittissime, dei litodomi, gusci di piccolissimi molluschi in grado di penetrare nel marmo.

Le tracce di quei microrganismi marini testimoniavano che l'edificio, costruito in terraferma, si era successivamente inabissato, per poi riemergere (con il borgo marinare circostante) grazie al sollevamento che dal decimo secolo aveva cominciato a spingere verso l'alto l'intera costa flegrea. Il re di Napoli era venuto a Pozzuoli nel 1758, per fare incetta di opere d'arte e reperti archeologici, con i quali abbellire la reggia che Luigi Vanvitelli gli stava realizzando a Caserta. Scavando tra i vigneti abbandonati, trovò pezzi meravigliosi del mondo antico imperiale. Quelle tre colonne, però, rimasero al loro posto. Il re non volle toccarle: si era reso conto dell'importanza scientifica della scoperta, che infatti suscitò l'interesse degli studiosi di tutto il mondo.

Fu così che il tempio di Serapide diventò il termometro naturale del bradisismo di Pozzuoli. Nello stesso tempo, però, cominciò lentamente a sprofondare, con l'intero borgo circostante. Con il Serapèo, tutta la zona bassa di Pozzuoli sprofondò in mare. Gli artistici pavimenti del tempio rimasero coperti da un metro e mezzo d'acqua. E San Paolo, in viaggio verso Roma per essere processato come cristiano, rimase colpito nel vedere la città flegrea «sommersa

nel fondo del mare, alla profondità di un braccio». Verso la fine del decimo secolo il nuovo, vigoroso, cambio di rotta del bradisismo, che ricominciò a spingere la terra di Pozzuoli e della zona flegrea verso l'alto. Una fase probabilmente drammatica, caratterizzata da una sensibile accentuazione dell'attività fumarolica e da numerosi, forti terremoti. L'epilogo nel 1198, quando all'interno della Solfatara si aprirono nuove bocche, dalle quali furono scagliate in aria tonnellite di pomici e di cenere. L'intera popolazione, infatti, terrorizzata dalle continue scosse, dai boati sempre più cupi, dalla pioggia nera di cenere e pietre, non seppe trovare altro rimedio che fuggire da Pozzuoli, cercando scampo verso Napoli e i centri dell'entroterra. Dopo l'eruzione, il suolo continuò a salire. Ma nella primavera del 1345 gran parte dell'antico abitato di Pozzuoli e di Baia era ancora sotto il mare. Lo racconta Giovanni Boccaccio, inviato di eccezione, nella cronaca di un suo viaggio compiuto nell'area puteolana. L'acqua in quel tempo entrava sino allo specchio interno dell'Averno. Completamente sommersi erano il Serapèo, le banchine portuali e il borgo marinaro di Pozzuoli, del lago Lucrino non c'era traccia, scomparse le spiagge.

Il Cinquecento fu il secolo dei terremoti e della disastrosa eruzione di Monte Nuovo. Prima del drammatico 1538 si registrò un'impennata sensibile del moto di sollevamento del suolo. L'attività sismica, sempre più martellante,

fece di nuovo scappare via in massa la popolazione. Ma stavolta i cronisti ebbero fegato. Seppero vincere la paura e rimasero al loro posto, in trincea, per tramandarci il racconto puntuale dell'eruzione e della straordinaria nascita di quella "montagna nova". Passarono molti anni, prima che qualcuno si decidesse a tornare sulle rovine del villaggio di Tripergole, sulle altezze ancora fumanti di Monte Nuovo. Intanto la spinta del bradisismo si era esaurita, la terra ricominciava a scendere. Nel Serapèo, fra i mosaici del pavimento spuntava l'acqua.

Le conseguenze di queste incredibili oscillazioni erano già note agli antichi greci. Ma i coloni di Samo che nel 529 avanti Cristo misero per la prima volta piede a Pozzuoli non ebbero paura delle fumarole e dei contrasti stridenti del paesaggio. Anzi si avvicinarono con interesse a quelle meraviglie della natura. La nuova città fu chiamata Dicearchia, la patria dei giusti, nel cuore dei Campi Flegrei, ardenti cioè. Dopo la parentesi sannita, con l'avvento dei Romani Dicearchia diventò Puteoli. Evidentemente il riferimento all'attività sismica locale (e perciò al bradisismo). Puteoli significava, infatti, "la città dei pozzi", grazie ai quali in maniera primordiale si tentava di tastare il polso al bradisismo e di conoscere le prime notizie essenziali per la popolazione costretta a vivere sulle viscere del vulcano.

Stima della probabilità di eruzioni

Jacopo Selva, Laura Sandri, Warner Marzocchi, Paolo Papale

La complessità e l'inaccessibilità dei sistemi vulcanici rende praticamente impossibile la previsione deterministica delle eruzioni. Si fa perciò ricorso a modelli che studino la probabilità di occorrenza delle eruzioni. Il modello BET_EF è stato applicato ai Campi Flegrei e nessun parametro indicativo di "unrest magmatico" è risultato anomalo. Per questa ragione le probabilità di unrest magmatico ed eruzione non hanno mai raggiunto i valori del 1982-84.

Introduzione

La complessità e l'inaccessibilità dei sistemi vulcanici rende praticamente impossibile la previsione deterministica delle eruzioni (Sparks, 2003). In tempi recenti sono stati sviluppati diversi modelli per studiare la probabilità di accadimento delle eruzioni vulcaniche, delle loro caratteristiche e dei conseguenti fenomeni pericolosi (Marzocchi et al., 2004; Neri et al., 2008; Marti et al., 2006). Questi modelli di "previsione probabilistica" (Probabilistic Volcanic Hazard Assessment, PVHA) stimano la probabilità delle fenomenologie su varie scale temporali (da pochi giorni, a decine di anni), tenendo conto della storia e/o dello stato del vulcano. Negli ultimi anni è stato presentato il modello BET_EF che si basa sul concetto di "albero degli eventi" e utilizza una formulazione Bayesiana (Marzocchi et al., 2008). Questa formulazione permette, da un lato, di effettuare stime della probabilità di eruzione integrando virtualmente tutte le fonti di informazione disponibili, e dall'altro di stimare le incertezze epistemiche, cioè quelle incertezze legate alla effettiva "mancanza di conoscenza" sui fenomeni studiati. Le possibili fonti di informazione sono modelli concettuali, opinione degli esperti, dati geologici, dati relativi alla storia del vulcano e misurazioni di parametri di monitoraggio. La stima probabilistica

è espressa come una distribuzione di probabilità, dove il valore centrale rappresenta la stima migliore della probabilità, mentre la dispersione della distribuzione intorno al valore centrale rappresenta una sorta di misura della precisione della stima prodotta.

Nel corso di diversi progetti finanziati dal Dipartimento della Protezione Civile, il modello BET_EF è stato applicato ai Campi Flegrei. Le informazioni utilizzate per questa applicazione includono la storia eruttiva della caldera, la dinamica delle crisi recenti (dal 1980), i risultati di studi e modelli geostrutturali, l'analisi del comportamento di altre caldere considerate "analoghe", fino a modelli interpretativi delle anomalie registrate dal sistema di monitoraggio. La soggettività delle scelte è stata gestita attraverso un esperimento di elicitation degli esperti, nel quale è stata raccolta l'opinione di più di 30 ricercatori esperti della storia, della dinamica e del monitoraggio dei Campi Flegrei. Il modello così prodotto (BETEF_CF), recentemente pubblicato in Selva et al. (2012a), è in grado di analizzare in tempo reale i risultati delle misure del sistema di monitoraggio, e di fornire automaticamente stime di lungo termine (basate su modelli e dati relativi alla storia del vulcano) e stime di breve termine (basate sull'interpretazione delle misure di monitoraggio).

In questo articolo, viene presentato il modello BETEF_CF nei suoi principali aspetti. A scopo illustrativo, viene riport-

tata una sua applicazione durante il periodo di crisi 1982-1985. Infine, vengono proposte alcune considerazioni relative allo stato attuale della caldera.

Modello BET_EF

BET_EF (Bayesian Event Tree for Eruption Forecasting, Marzocchi et al. 2008) è un modello Bayesiano che, come già accennato, stima le probabilità degli eventi vulcanici e le relative incertezze epistemiche. Il modello è basato sul concetto di “albero degli eventi” (Event Tree, ET). Un ET è un grafico ramificato che da un evento generale esplora tutte le possibili evoluzioni del sistema con un livello di dettaglio via via crescente. La ramificazione ad ogni livello (o nodo) rappresenta tutte le possibili conseguenze (fisiche o logiche) di un evento più generale, riportato al livello precedente. L’ET utilizzato dal modello BET_EF è rappresentato in Figura 1. In particolare:

- Al *nodo 1*, l’evento considerato è l’accadimento di un “unrest”, cioè di uno stato di anomalia del vulcano. Questo stato di anomalia viene riferito al livello di base, definito quantitativamente in maniera tale da includere

tutti quegli eventi che possono essere considerati “normali” per il vulcano. Questa definizione, necessariamente soggettiva come ogni definizione di livello di base, si fonda su considerazioni pragmatiche legate alla scelta temporale scelta per la previsione probabilistica.

- Al *nodo 2*, si considera la possibilità che un evento di unrest possa essere “magmatico”. Nei sistemi vulcanici attivi, la presenza di magma è scontata. Per questo motivo, a questo nodo ci si riferisce pragmaticamente alla possibilità che corpi magmatici si “attivino”, cioè si muovano, all’interno del sistema.
- Al *nodo 3*, si considera l’evento eruzione, assumendo che ci siano corpi magmatici in movimento (“unrest magmatico”). In altre parole, si analizza l’eventualità che questi corpi magmatici possano raggiungere la superficie, determinando una eruzione.
- Al *nodo 4*, si studiano le possibili posizioni delle bocche eruttive, assumendo che avvenga una eruzione. In un vulcano centrale, come il Vesuvio, la posizione largamente più probabile è il cratere sommitale. Nelle caldere, come i Campi Flegrei, la va-



Figura 1. Generico albero degli eventi (ET) del modello BET_EF (da Marzocchi et al., 2008).

riabilità spaziale è molto più ampia e rappresenta una delle maggiori fonti di incertezza.

- Al nodo 5, infine, si considera la taglia (o magnitudo) dell'eruzione. La variabilità delle taglie eruttive è in realtà un continuo, ma si punta a definire pragmaticamente gruppi di eruzioni che possano, nel loro insieme, caratterizzare l'intero arco di taglie eruttive possibili. La metrica per definire la taglia dipende dal tipo di applicazione prevista, ma può generalmente essere riferita al VEI (indice di esplosività vulcanica, equivalente vulcanico della magnitudo sismica).

In pratica, ad ogni nodo, si considerano le possibilità di sviluppo dell'evento definito al nodo precedente. Queste possibilità vengono denominate "rami". Il modello BET_EF definisce le probabilità per tutti i rami ad ogni nodo, condizionate all'accadimento dell'evento al nodo precedente. La probabilità assoluta di ogni evento risulta calcolabile come il prodotto delle probabilità condizionate al nodo e a tutti i nodi precedenti.

Il punto cruciale del modello BET_EF è il modo in cui queste probabilità condizionate vengono calcolate. BET_EF utilizza un modello Bayesiano, nel quale il valore teorico di probabilità (legato a modelli, esperienza, ecc.) definisce la distribuzione *a priori*, che viene aggiornata alla luce dei dati registrati per l'evento considerato attraverso il teorema di Bayes, per determinare la distribuzione *a posteriori*. Questa regola generale viene applicata ad ogni nodo dell'ET. L'aspetto fondamentale sta nel capire quali informazioni siano rilevanti per la stima di queste probabilità.

BET_EF alterna due metodi di stima, definiti di breve e di lungo termine. Quando uno stato di anomalia è rilevato al nodo 1, si possono aspettare variazioni significative dello stato del vulcano in tempi relativamente brevi (mesi). In

questo caso, le stime di probabilità si basano su quanto viene misurato dal sistema di monitoraggio. Questo tipo di stima viene definito di breve termine. Se invece non sono riscontrate anomalie, il sistema di monitoraggio non dà informazioni sullo stato del vulcano. In queste fasi non sono attese variazioni significative nel breve termine e le stime di probabilità sono basate su modelli e su dati relativi alla storia del vulcano. Questo tipo di stima viene definito di lungo termine.

Questa regola generale non è valida per tutti i nodi. Il sistema di monitoraggio infatti non è in grado di dare informazioni su tutti gli eventi dell'ET. In particolare, non è in grado di distinguere le diverse taglie eruttive (nodo 5), e solo parzialmente può essere indicativo della posizione (nodo 4). Per questo, le definizioni relative alle stime di breve periodo si riferiscono ai soli nodi 1, 2 e 3. Per il nodo 5, stime di breve e di lungo periodo coincidono. Per il nodo 4, la distribuzione di alcuni eventi (es., i terremoti) può influenzare le stime di breve periodo (Marzocchi et al. 2008; Lindsay et al. 2010). Limitandoci ai nodi 1, 2 e 3 la definizione del modello BET_EF passa attraverso:

1. la definizione dello stato del livello di base al nodo 1, che determina il passaggio tra stime di breve e di lungo termine;
2. la definizione delle anomalie ai nodi 2 e 3, per la stima delle probabilità di breve termine;
3. la definizione dei modelli e dei dati della storia del vulcano considerata quale riferimento per la stima delle probabilità di lungo termine.

Modello BETEF_CF: applicazione del BET_EF ai Campi Flegrei

La definizione del modello BET_EF per i Campi Flegrei è stata fatta nel corso

di due progetti finanziati dal Dipartimento della Protezione Civile. In particolare, tutte le definizioni necessarie alla interpretazione delle misure di monitoraggio, essendo di natura soggettiva, sono state prodotte attraverso un esperimento ripetuto di elicitazione degli esperti (Selva et al. 2012a). Queste elicitazioni hanno coinvolto più di 30 ricercatori, e hanno comportato cicliche discussioni, compilazione dei questionari e discussione dei risultati, per un totale di 5 esperimenti in 5 anni (2005-2010). Ulteriori esperimenti sono previsti per aggiornare questi risultati alla luce delle più recenti conoscenze scientifiche. I risultati dimostrano una sostanziale convergenza degli esperti verso un quadro interpretativo coerente e consistente. Nello specifico, ad ogni nodo (1, 2 e 3), gli esperti hanno definito quali *anomalie* siano specificamente informative e per quanto tempo (*inerzia*), *le soglie* (un minimo ed un massivo valore di misura) per la definizione delle anomalie, e quanto queste anomalie possano essere considerate informative (*pesi*). I risultati di questo esperimento sono riportati in Tabella 1. Si noti che alcuni parametri sono booleani, cioè possono assumere i soli valori VERO/FALSO. In questo caso, non è ovviamente necessaria la definizione di una doppia soglia.

Particolarmente importante è stata la definizione dello stato di unrest (nodo 1). Infatti, i Campi Flegrei possono essere considerati in uno stato di “anomalia” da molti anni, a partire dagli anni ’70, cioè da quando la secolare subsidenza è stata interrotta da periodi di improvviso sollevamento del suolo. Questa definizione di “anomalia”, però, risulta pragmaticamente inutile per stime di probabilità di breve termine. Per questo motivo, si è deciso di identificare i periodi di “specifica attenzione”, nei quali possa essere necessario porsi il problema di eventuali escalation eruttive.

La definizione di background implicita nella definizione di anomalie al nodo 1 è stata poi utilizzata per stimare la probabilità a lungo termine di unrest (Selva et al. 2012a). Modelli concettuali, dati passati ed informazioni da caldere simili ai Campi Flegrei, hanno poi portato alla definizione delle probabilità relative ai nodi 2 e 3. L’insieme di queste analisi ha portato ad una stima di probabilità di eruzione di $1,6 \cdot 10^{-3}$ al mese (migliore stima) e di un intervallo di confidenza $[4 \cdot 10^{-5}, 4 \cdot 10^{-3}]$ al mese. Questa probabilità risulta confrontabile con la stima della probabilità di eruzione al Vesuvio (Marzocchi et al. 2004).

Le probabilità a lungo termine relative al nodo 4 (posizione della bocca eruttiva) sono state effettuate utilizzando dati geo-strutturali e dati relativi alla storia eruttiva recente della caldera. I risultati di questa analisi (Selva et al. 2012b) sono riportati in Figura 2a.

Le probabilità a lungo termine relative al nodo 5 (taglia delle eruzioni) sono state basate sulla distribuzione generica degli eventi in caldere simili, e sulle rivalutazione delle taglie delle eruzioni avvenute ai Campi Flegrei (Orsi et al., 2009). I risultati sono riportati in Figura 2b.

L’insieme di queste analisi determina una definizione completa del modello BETEF_CF. Questo modello fornisce stime di lungo termine su tutti i possibili scenari eruttivi ai Campi Flegrei. Inoltre, basandosi sulle misurazioni del monitoraggio, può essere utilizzato in tempo reale per analizzare i periodi di crisi, fornendo stime di breve periodo. Un esempio di questo tipo di applicazioni è riportato nel prossimo paragrafo.

Applicazione alla crisi del 1982-85

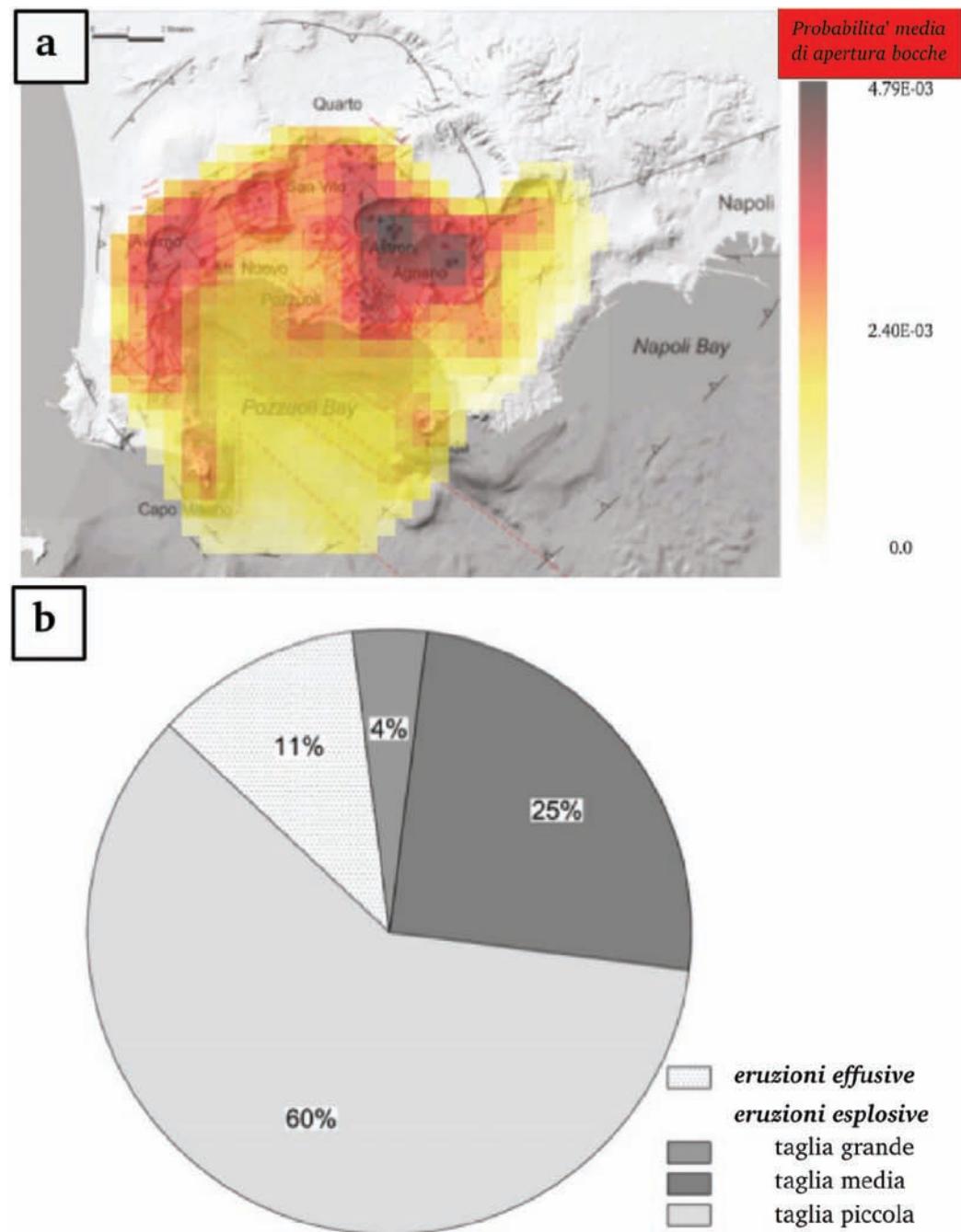
Il modello BETEF_CF è stato utilizzato per effettuare un’analisi retrospettiva delle probabilità di unrest (nodo 1), unrest magmatico (nodo 2) ed eruzione

Tabella 1. Parametri e soglie risultanti dall'esperimento di elicazione degli esperti. Per ogni parametro e ad ogni nodo, sono riportate soglia inferiore, superiore e relazione d'ordine relative alla definizione dello stato anomalo, peso dell'informazione (per i soli nodi 2 e 3) e inerzia (da Selva et al., 2012a).

	Definizione	Inerzia	Unità	Soglie	Peso
Nodo 1					
1	# VT ($M > 0,8$)	*	ev/giorno	> 5-15	-
2	# LP/VLP/ULP	*	ev/mese	> 2-10	-
3	Sollevamento	cum. ultimi 3 mesi	cm	> 2-6	-
4	Velocità sollevamento	ultimi 3 mesi	cm/mese	> 0,7-1,3	-
5	Nuove fratture	ultimi 3 mesi	-	SI/NO	-
6	Estensione delle strutture di degassamento o aumento flussi	ultimo mese	-	SI/NO	-
7	Presenza gas acidi (HF, HCl, SO_2)	ultima settimana	-	SI/NO	-
8	Temperature alla fumarola "Pisciarelli"	ultimo mese	C	> 100-110	-
Nodo 2					
1	# VT profondi ($> 3,5 \text{ km}$, $M > 0,8$)	*	ev/giorno	> 2-20	0,9
2	# LP profondi ($> 2,0 \text{ km}$)	*	ev/mese	> 3-20	0,5
3	# VLP/ULP	*	ev/mese	> 1-5	1
4	Presenza di tremore	ultimo mese	-	SI/NO	1
5	Presenza di tremore profondo ($> 3,5 \text{ km}$)	ultimo mese	-	SI/NO	1
6	Sollevamento	cum. ultimi 3 mesi	cm	> 5-15	1
7	Nuove fratture	ultimi 3 mesi	-	SI/NO	0,2
8	Variazione macroscopica del pattern deformativo (decine di m)	ultimi 3 mesi	-	SI/NO	1
9	Presenza gas acidi (HF, HCl, SO_2)	ultima settimana	-	SI/NO	1
10	Variazione nella componente magmatica	ultimo mese	-	SI/NO	0,1
Nodo 3					
1	Accelerazione nel # eventi sismici	ultima settimana	-	SI/NO	1
2	Accelerazione RSAM	ultima settimana	-	SI/NO	0,7
3	Presenza di tremore	ultimo mese	-	SI/NO	1
4	Dispersione ipocentri (range profondità) (10° - 90° perc.)	ultima settimana	km	> 1-3	0,3
5	Variazione macroscopica del pattern deformativo (decine di m)	ultima settimana	-	SI/NO	1
6	Migrazione del massimo incrementale (m)	ultima settimana	-	SI/NO	0,7
7	Nuove fratture	ultimi 3 mesi	-	SI/NO	0,4
8	Presenza di gas acidi (HF, HCl, SO_2)	ultima settimana	-	SI/NO	1
9	Attività freatica	ultima settimana	-	SI/NO	1

* Numero degli eventi osservati diviso per il numero di giorni dall'osservazione.

Figura 2.
Migliori stime
delle probabilità
condizionate ai nodi
4 (posizione bocche
eruttive, panel A, da
Selva et al., 2012b)
e 5 (taglia delle
eruzioni, panel B, da
Orsi et al., 2009).



(nodo 3) durante la crisi bradisismica del periodo 1982-85. Sono state ricercate in letteratura (ad esempio, Orsi et al., 1999) le informazioni quantitative relative ai parametri sismici e deformativi elencati in Tabella 1, e si è applicato il codice BETEF_CF retrospettivamente

per quel periodo. I risultati sono mostrati in Figure 3 e 4 e mostrano:

1. un sostanziale riconoscimento di un lungo periodo di unrest che ha caratterizzato con certezza (probabilità uguale a 1) quasi tutto il periodo da metà 1982 a inizio 1985 (Figure 3 e 4a);

2. una probabilità media di unrest dovuto ad un ruolo attivo del magma (unrest magmatico) stabile attorno al 70% per buona parte del periodo di unrest (Figura 3), principalmente dovuto all'entità del sollevamento accumulato; tuttavia, essendo questo l'unico parametro indicativo di magma risultato decisamente anomalo sul periodo, la dispersione associata a questa stima di probabilità di unrest di origine magmatica è ampia (dal 10% al 100% in termini di 10° e 90° percentili, Figura 4b);
3. una probabilità media di eruzione stabile attorno al 20% per tutto il periodo di unrest magmatico (Figura 3), con un picco al 40% nell'estate del 1983 dovuto all'aprirsi di una frattura riportata il letteratura (Orsi et al., 1999): anche in questo caso, essendo la frattura l'unico parametro indicativo di magma risultato anomalo, la dispersione associata alla stima di probabilità di eruzione è molto ampia (da valori vicini allo 0% a circa 95% in termini di 10° e 90° percentili, Figura 4c).

I risultati dell'applicazione del BETEF_CF al periodo 1982-85, lungamente discussi con i vulcanologi che operavano all'epoca, riflettono l'opinione, attualmente condivisa, che l'attività osservata in quel periodo fosse la manifestazione superficiale di un'intrusione di magma; non devono pertanto ritenersi esageratamente alte le probabilità di eruzione fornite dal BETEF_CF: il modello “contiene” le opinioni degli esperti ed i suoi risultati riflettono la loro opinione.

Considerazioni sullo stato attuale dei Campi Flegrei

Attualmente è in corso di sperimentazione l'applicazione in tempo reale del BETEF_CF. Da un'analisi preliminare sui dati raccolti dal 2011, BETEF_CF identifica un primo marcato episodio di unrest, dovuto ad un rapido sollevamento (uplift), a partire dalla primavera 2011 e durato fino a fine 2011, benché sull'ultimo periodo l'anomalia della velocità di uplift (e quindi il grado di unrest) fosse più debole. A partire da

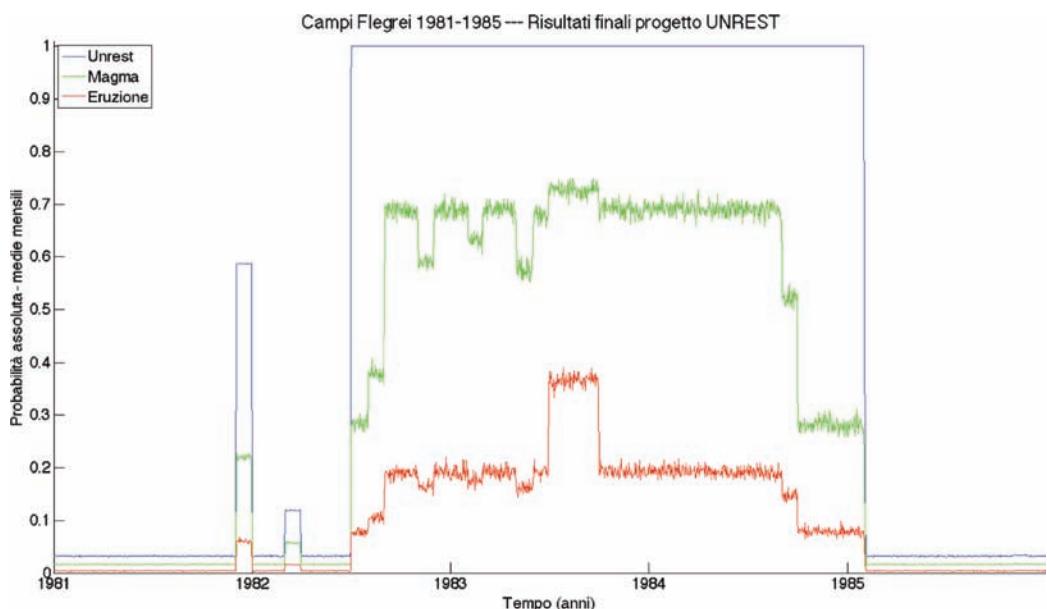
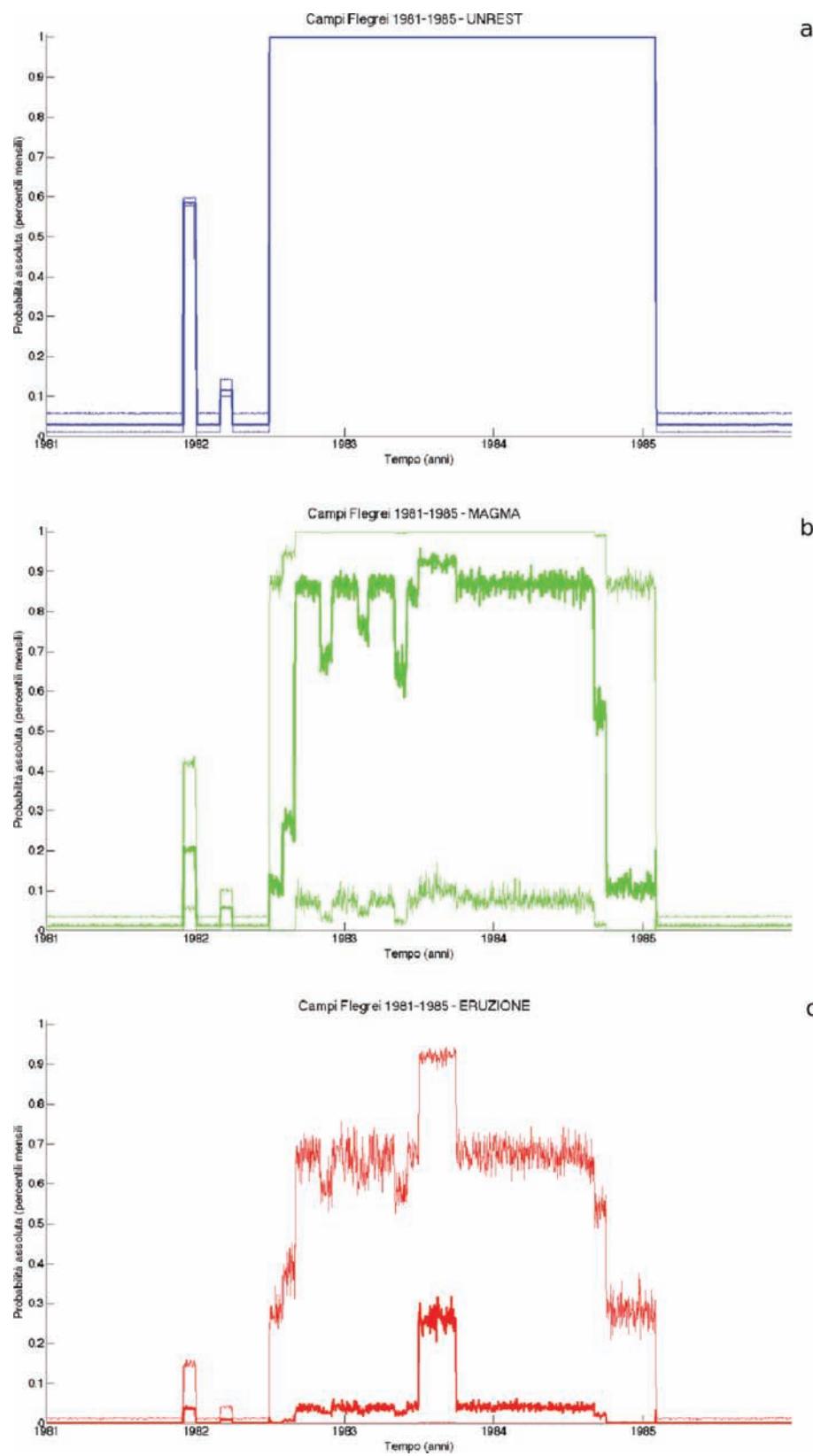


Figura 3. Andamento temporale delle medie mensili delle distribuzioni di probabilità di unrest (blu), unrest magmatico (verde) ed eruzione (rosso) per il periodo 1981-85 ai Campi Flegrei.

Figura 4. Andamento temporale dei percentili mensili delle distribuzioni di probabilità di unrest (a), unrest magmatico (b) ed eruzione (c) per il periodo 1981-85 ai Campi Flegrei. La linea grossa mostra la mediana, mentre le linee sottili mostrano i percentili 10° e 90°.



agosto 2012 circa, si è osservata nuovamente una velocità di uplift superiore alla soglia, e a tutt'oggi l'unrest non è cessato. Tuttavia, nessun parametro indicativo di “unrest magmatico” è risultato anomalo, e per questa ragione le probabilità di unrest magmatico ed eruzione non hanno mai raggiunto i valori del 1982-85.

Bibliografia

- DPC-V1 (2007-2010), UNREST. Realizzazione di un metodo integrato per la definizione delle fasi di unrest ai Campi Flegrei, finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile
- DPC-V3 (2005-2007). Ricerche sui vulcani attivi, precursori, scenari, pericolosità e rischio, finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile
- Lindsay J., Marzocchi W., Jolly G., Constantinescu R., Selva J., Sandri L. (2010). Towards real-time eruption forecasting in the Auckland Volcanic Field: testing of BET_EF during the New Zealand National Disaster Exercise ‘Ruaumoko’. *Bull. Volcanol.* 72 (2), 185-204.
- Marti J., Aspinall W.R., Sobradelo R., Felpeto A., Geyer A., Ortiz R., Baxter P., Cole P.D., Pacheco J., Blanco M.J., Lopez C. (2008). A long-term volcanic hazard event tree for Teide-Pico Viejo stratovolcanoes (Tenerife, Canary Islands). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 178:543-552.
- Marzocchi W., Sandri L., Gasparini P., Newhall C., Boschi E. (2004). Quantifying probabilities of volcanic events: the example of volcanic hazard at Mount Vesuvius. *J. Geophys. Res.*, 109, B11201.
- Marzocchi W., Sandri L., Selva J. (2008). BET_EF: a probabilistic tool for long- and short-term eruption forecasting. *Bull. Volcanol.* 70 (5), 623-632.
- Orsi G., Civetta L., Del Gaudio C., de Vita S., Di Vito M.A., Isaia R., Petrazzuoli S.M., Ricciardi G.P., Ricco C. (1999). Short-term ground deformations and seismicity in the resurgent Campi Flegrei caldera, Italy: an example of active block-resurgence in a densely populated area. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 91, 415-451.
- Orsi G., Di Vito M.A., Selva J., Marzocchi W. (2009). Long-term forecasting of eruption style and size at Campi Flegrei caldera (Italy). *Earth Planet. Sci. Lett.* 287, 265-276.
- Neri A., Aspinall W.P., Cioni R., Bertagnini A., Baxter P.J., Zuccaro G., Andronico D., Barsotti S., Cole P.D., Esposti Ongaro T., Hincks T.K., Macedonio G., Papale P., Rosi M., Santacroce R., Woo G. (2008). Developing an event tree for probabilistic hazard and risk assessment at Vesuvius. *J. Volcanol. Geotherm Res.* 178:397-415.
- Selva J., Marzocchi W., Papale P., Sandri L. (2012a). Operational eruption forecasting at high-risk volcanoes: the case of CampiFlegrei, Naples. *J. Applied Volcanol.* 1:5.
- Selva J., Orsi G., Di Vito M.A., Marzocchi W., Sandri L. (2012b). Probability hazard map for future vent opening at the CampiFlegrei caldera, Italy. *Bull. Volcanol.* 74, 497-510.
- Sparks R.S.J. (2003). Frontiers: forecasting volcanic eruptions. *Earth Planet. Sci. Lett.* 210:1-15.

Terremoti in aree vulcaniche: i Campi Flegrei

Paolo Capuano

Negli ultimi trent'anni si è fortemente sviluppata la sismologia vulcanica e si è scoperta l'esistenza di caratteristiche specifiche dei vulcani. Le caratteristiche riscontrate nei Campi Flegrei tendono ad attribuire un ruolo fondamentale alla dinamica del sistema idrotermale.

Il terremoto, inteso come lo scuotimento del suolo prodotto da fenomeni endogeni, è uno dei fenomeni naturali più diffusi e frequenti (10^6 eventi per anno, come ordine di grandezza). Poiché rappresenta una minaccia per la sua vita, per le sue opere e costruzioni, ma anche per il tessuto economico e sociale delle comunità, l'uomo ha sempre cercato, fin dai tempi dei Greci, di svelare come e dove si genera un terremoto per non averne più solo paura e per cercare di ridurre gli effetti nefasti che esso produce per la sua vita. Infatti, il terremoto evoca nell'uomo moderno l'idea della distruzione delle cose che più o meno fatidicamente e adeguatamente ha realizzato.

La data di nascita della moderna sismologia, la scienza che studia i terremoti, viene ricondotta al XVIII secolo, a seguito dei forti terremoti di Lisbona (1755) e della Calabria (1783), in quanto cominciarono ad essere elaborate ipotesi sull'origine dei terremoti basate su valutazioni scientifiche e non più solo filosofico-religiose.

L'idea di terremoto è stata modificata dall'incremento delle conoscenze che lo sviluppo scientifico ha prodotto grazie all'evoluzione sia della strumentazione per la osservazione quantitativa, che delle procedure per il calcolo e l'analisi più avanzate. Oggi, la fenomenologia del terremoto, inteso come lo scuotimento del suolo prodotto dalle onde

sismiche che propagandosi dal fuoco (ipocentro) raggiungono la superficie terrestre, è ben compresa nel modello della fratturazione delle rocce lungo zone di fragilità (piani di faglia) che, rompendosi, irradiano onde sismiche generalmente caratterizzate da fasi ben definite e delle quali le principali sono le cosiddette fasi P (onde longitudinali) ed S (onde trasversali). Questo modello ha consentito di migliorare notevolmente la comprensione del fenomeno sismico, anche per valutare l'effetto che lo scuotimento del suolo generato dalle onde sismiche produce sull'ambiente naturale e costruito.

Negli ultimi trent'anni si è fortemente sviluppata la sismologia vulcanica, ovvero la sismologia che si occupa dello studio della natura e della dinamica dei segnali sismici relazionabili con l'iniezione e il trasporto di magma e dei fluidi idrotermali associati. Anche in questo caso, lo sviluppo di sensori capaci di rilevare le oscillazioni del suolo in un intervallo di frequenze più ampio e lo sviluppo di procedure di calcolo per l'analisi di segnali non impulsivi hanno svelato l'esistenza di caratteristiche della sismicità specifiche dei vulcani. Sono stati, infatti, osservati ed analizzati segnali sismici di tipo diverso, attribuiti a processi fisici differenti dalla fratturazione delle rocce.

Questa maggiore complessità della sismicità in aree vulcaniche si traduce anche in una maggiore complessità

della terminologia utilizzata [1]. Terminologia che è generalmente basata sulle caratteristiche del contenuto in frequenza dei segnali osservati. Bisogna notare, comunque, che essa rimane un problema per la sismologia vulcanica sulla quale un consenso completo non è stato ancora raggiunto.

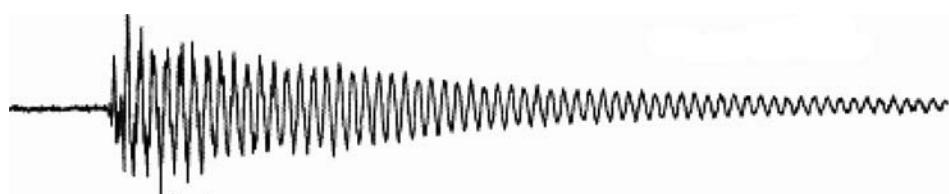
Cerchiamo, allora, di fare un poco di chiarezza. Le tipologie più frequenti e riconosciute di eventi che si verificano in aree vulcaniche sono: 1) eventi ad alta frequenza (HF, *high frequency*) che hanno caratteristiche simili a quelle dei terremoti da fratturazione delle rocce e pertanto sono anche detti vulcano-tettonici (VT); 2) tremore vulcanico; 3) eventi a bassa frequenza (LF, *low frequency*, o LP, *long period*) con la sottocategoria di quelli a frequenza molto bassa (VLP, *very long period*); 4) esplosioni.

1. Gli eventi vulcano-tettonici (VT) sono molto simili ai terremoti tettonici, con fasi sismiche ben definite, ed il processo che li genera, la fratturazione di taglio delle rocce, è ben compreso. Lo studio di questi terremoti è utile per determinare le caratteristiche dello stato in cui si trova il vulcano e possono, in alcuni casi, essere utili nell'individuare migrazioni del magma verso la superficie. Talvolta, tra gli eventi VT, si osservano caratteristiche della sorgente anomale (cosiddetti meccanismi "non doppia coppia"), che indicano una maggiore complessità del processo di genesi dei terremoti.
2. Il tremore vulcanico è il più caratteristico dei segnali sismici registrati sui vulcani attivi. Il tremore, quasi con-

tinuo, è generalmente caratterizzato da una banda di frequenza limitata (0,5-5 Hz) quasi monocromatica ed una durata lunga (ore, giorni, settimane) rispetto agli eventi VT (decine di secondi). Il tremore, associato a variazioni di pressione di poro legate alla liberazione di gas in un magma o alla fusione delle rocce, è quindi una risposta del sistema vulcanico ad una eccitazione sostenuta nel tempo.

3. L'attività sismica a bassa frequenza LP (1-5Hz), insieme al tremore vulcanico, è stata ampiamente osservata in relazione alle attività magmatiche e idrotermali in aree vulcaniche ed è stata riconosciuta come un fenomeno precursore per l'attività eruttiva [2], tanto da diventare il Santo Graal della sismologia vulcanica. La forma d'onda degli eventi LP è caratterizzata da semplici oscillazioni armoniche smorzate, tranne che per un breve intervallo di tempo alla comparsa dell'evento (Figura 1). Questa firma caratteristica è comunemente interpretata come dovuta alla pressurizzazione di fluidi nei condotti vulcanici, in risposta ad un'eccitazione localizzata nel tempo. A differenza degli eventi VT, non è possibile localizzare questa sismicità con metodi convenzionali a causa dell'assenza di fasi impulsive. Gli eventi LP sono particolarmente importanti nella quantificazione dei processi vulcanici e idrotermali, poiché consentono di ricostruire le proprietà del sistema sorgente di questi eventi e quindi lo stato di criticità del sistema vulcanico.

Figura 1. Esempio di segnale LP caratterizzato dalla coda quasi-armonica, dopo un inizio più ricco di alte frequenze.



4. Le cosiddette esplosioni vulcaniche, cioè onde che si propagano anche nell'aria, caratterizzano il comportamento di alcuni vulcani, come Stromboli; sono state studiate negli ultimi anni con l'utilizzo di microfoni infrasonici o sensori di pressione, ad integrazione di reti sismiche. Infatti, le onde acustiche in atmosfera sono poco influenzate da effetti di propagazione come lo sono le onde sismiche nel terreno. Quindi, i dati acustici danno una visione più diretta di alcuni processi esplosivi ed eruttivi.

Il tentativo di classificazione in base al contenuto in frequenza (Figura 2), può descrivere bene il comportamento di ogni singolo vulcano, ma non vincola necessariamente eventi simili in due diversi vulcani ad essere causati dagli stessi meccanismi fisici. In ogni caso, la comprensione dell'origine degli eventi LP e del tremore è di importanza critica poiché le eruzioni vulcaniche, generalmente, sono precedute ed accompagnate da questo tipo di sismicità che quindi può fornire informazioni utili per una previsione a breve termine [3].

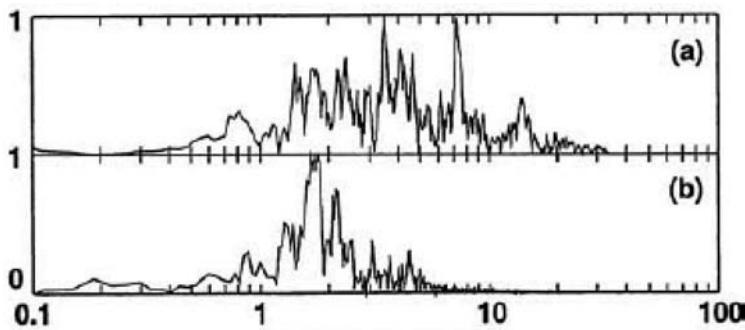
Per completezza di informazione sull'evoluzione delle conoscenze sui segnali sismici, va detto che, a seguito della migliorata capacità sperimentale di osservare il moto del suolo, sono state individuate nuove caratteristiche sismiche anche in zone non vulcaniche, per

cui è stato introdotto anche il concetto di tremore non vulcanico e di terremoto lento.

Possiamo ora chiederci cosa si osserva nei Campi Flegrei di tutta questa fenomenologia che la sismologia vulcanica ha svelato negli anni più recenti?

L'inizio della descrizione della sismicità ai Campi Flegrei risale all'eruzione del Monte Nuovo nel 1538 che, secondo documenti storici, sarebbe stata preceduta da terremoti avvertiti circa 100 anni prima [4]. Dopo alcuni secoli di subsidenza (abbassamento del suolo) successivi a quest'ultima eruzione, la caldera dei Campi Flegrei mostra chiare evidenze di ripresa della fase di sollevamento dagli anni Settanta. Infatti, nei periodi 1970-1972 e 1982-1984 avvengono due intensi episodi di sollevamento (per complessivi 3,5 m circa nel punto di massimo sollevamento), accompagnati anche da attività sismica, che nel primo caso è stata solo parzialmente osservata ed analizzata a causa del basso numero di stazioni sismiche che all'epoca erano distribuite sul territorio. Nel 1970-72, in ogni caso, la sismicità è di moderata intensità con alcune centinaia di eventi VT con magnitudo $M < 2$, di cui solo pochi sono avvertiti dalla popolazione, insieme ad altri eventi di origine artificiale, che successivamente sono stati individuati come dovuti alla pesca di frodo con esplosivo, allora molto praticata. La sequenza sismica del periodo 1982-84 è la più rilevante degli ultimi 60 anni registrata ai Campi Flegrei, in termini di numero ed energia degli eventi. Questo periodo è caratterizzato da un'intensa sequenza di eventi VT (più di 10.000) che raggiungono una magnitudo massima $M = 4,2$ ed, in particolare, con uno sciamone di circa 500 scosse l'1 aprile 1984, tanto da determinare una parziale evacuazione della città di Pozzuoli. La maggior parte della sismicità è concentrata nell'area Pozzuoli-Solfatara, con pochi eventi nella parte occidentale

Figura 2. Esempi di spettri di ampiezza normalizzati per un evento VT (a) e per un evento LP (b).



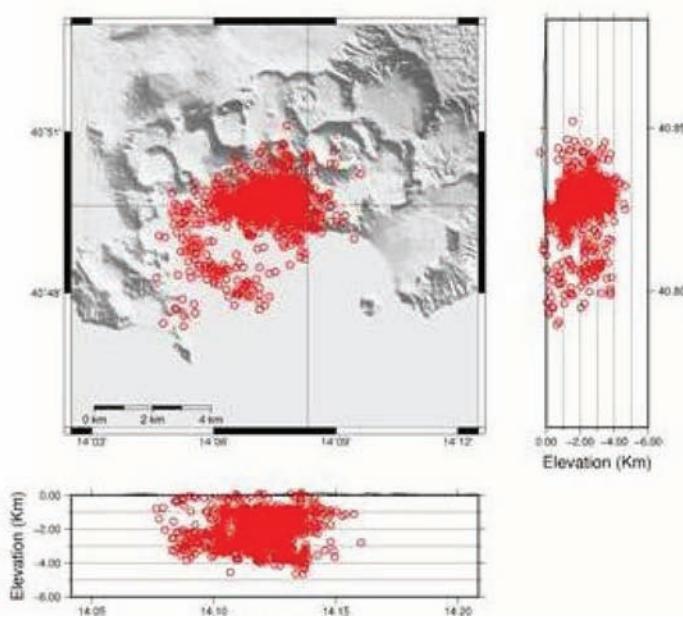


Figura 3.
Distribuzione
spaziale della
sismicità (VT) nel
periodo 1982-84.

della baia di Pozzuoli (Figura 3). In entrambi questi periodi non vi è nessuna evidenza sperimentale del verificarsi di eventi LP e/o tremore vulcanico.

Dopo questo secondo episodio, il bradisismo ha invertito la tendenza con un lento abbassamento del suolo, interrotto da brevi (settimane) e poco intensi momenti di sollevamento, generalmente accompagnati da attività sismica (eventi VT) di bassa energia. I terremoti, pur se di bassa energia, sono in alcuni casi avvertiti dalla popolazione a causa della piccola profondità alla quale si originano (1-2 km). Questi brevi eventi di sollevamento dal 2000 sono diventati più persistenti ed intensi e connessi con sciami sismici. Infatti, episodi di sollevamento si sono verificati nel 2000 e poi nel 2005-06, 2008-09 e 2011-12 accompagnati da brevi sciami sismici di bassa energia, principalmente costituiti da eventi VT, ma in alcuni casi, per esempio nel luglio 2000 e nell'ottobre 2006, anche da eventi LP localizzati nell'area della Solfatara e zone circostanti, in particolare verso Pisciarelli [5]. L'individuazione di questi eventi LP è senz'altro dovuta

anche al miglioramento delle capacità di osservazione ed analisi sviluppate negli ultimi anni; in ogni caso, un'analisi retrospettiva sulle registrazioni sismiche degli anni passati, ha evidenziato alcuni eventi LP anche in altre fasi precedenti di lieve sollevamento del suolo [6].

In definitiva, negli ultimi trent'anni nei Campi Flegrei i segnali sismici che vengono rilevati sono essenzialmente costituiti da eventi VT ed in misura minore da eventi LP. Queste caratteristiche della sismicità tendono ad evidenziare come ai Campi Flegrei gioca un ruolo fondamentale la dinamica del sistema idrotermale. Infatti, essa definisce l'interazione dei fluidi con le rocce circostanti nella generazione dei segnali sismici sia di tipo LP, dovuti alle variazioni della pressione di poro per la migrazione di fluidi attraverso le fratture, sia di tipo VT, a causa della riduzione della resistenza al taglio delle rocce a seguito della diffusione di fluidi nelle rocce.

Bibliografia

1. McNutt S.R. (2005). Volcanic seismology. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 32, 461-91, doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122459.
2. Chouet B.A. (2003). Volcano seismology. *Pure appl. geophys.*, 160, 739-788.
3. Chouet B.A. (1996). Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting. *Nature*, 380, 309-316.
4. Scandone R.,
5. Saccorotti G., Petrosino S., Bianco F., Castellano M., Galluzzo D., La Rocca M., Del Pezzo E., Zaccarelli L., Cusano P. (2007). Seismicity associated with the 2004-2006 renewed ground uplift at Campi Flegrei Caldera. *Italy. Phys. Earth Planet. Inter.*, 165, 14-24.
6. D'Auria L., F. Giudicepietro, I. Aquino, G. Borriello, C. Del Gaudio, D. Lo Bascio, M. Martini, G. P. Ricciardi, P. Ricciolino, C. Ricco (2011). Repeated fluid-transfer episodes as a mechanism for the recent dynamics of Campi Flegrei caldera (1989-2010). *J. Geophys. Res.*, 116, B4, doi: 10.1029/2010JB007837.

Le perforazioni profonde a scopo scientifico: esiste un rischio “sismico”?

Giuseppe De Natale, Paolo Gasparini

Perforazioni e carotaggi sono importanti per conoscere la struttura superficiale del pianeta. Le perforazioni profonde a scopo scientifico possono essere cruciali per la soluzione di importanti problemi scientifici inerenti la mitigazione dei rischi sismici e vulcanici. Il Campi Flegrei Deep Drilling Project è iniziato nel 2009 con una perforazione esplorativa che ha raggiunto una profondità di 500 m. È dimostrabile che tale perforazione non ha avuto alcuna influenza sulla fenomenologia in atto ai Campi Flegrei.

Malgrado le metodologie geofisiche per indagare l'interno della Terra abbiano fatto grandi passi avanti negli ultimi decenni, il metodo di indagine più efficace per conoscere almeno la struttura superficiale del nostro pianeta è quello diretto, con perforazioni e carotaggi. Il problema principale delle metodologie “indirette”, quali le geofisiche, è che all'aumentare della profondità diminuisce il potere risolutivo, e quindi la possibilità di rilevare la presenza e le caratteristiche di corpi di piccola dimensione. Inoltre, alcuni parametri importanti delle rocce (ad esempio lo stato termico) possono essere determinati da tali metodi solo con grande incertezza. Il carotaggio della crosta terrestre permette, al contrario, di determinare con precisione tutte le proprietà di interesse, sebbene in maniera puntuale, ossia nel solo punto di perforazione. Le metodologie geofisiche di prospezione hanno quindi il loro utilizzo ottimale nel correlare i risultati ottenuti da perforazioni effettuate in località diverse. Le perforazioni possono fungere da punti di calibrazione per le immagini ottenute da metodologie geofisiche che permettono di indagare estesi volumi di sottosuolo.

Il problema principale delle perforazioni profonde è il costo, ordini di grandezza maggiore di quello delle normali metodologie geofisiche. Per questo motivo le perforazioni non costituiscono un me-

todo di indagine diffuso nella ricerca scientifica, che in genere non dispone di ingenti risorse. Al contrario, esse, anche al solo scopo di prospezione, sono comuni nelle attività altamente remunerative che utilizzano il sottosuolo: minerali, petrolifere, geotermiche, ecc.

Nello studio dei terremoti e dei vulcani le perforazioni profonde a scopo scientifico possono essere cruciali per la soluzione di importanti problemi inerenti la mitigazione dei rischi sismici e vulcanici. Negli ultimi decenni infatti importanti problemi sismologici e vulcanologici sono stati affrontati ed in parte risolti con l'uso di perforazioni scientifiche: ne sono un esempio il progetto SAFOD lungo la faglia di San Andreas in California e quelle realizzate nell'area del vulcano Unzen in Giappone e nella caldera di Long Valley in California. La caldera dei Campi Flegrei è stata esplorata con perforazioni fin dalla fine degli anni '30 del secolo scorso, per la ricerca geotermica (Carlino et al., 2012; AGIP, 1987). La campagna di esplorazione degli anni '80, in particolare, sebbene finalizzata a scopi geotermici, ha fornito informazioni che ancor oggi rappresentano la sorgente di conoscenza di maggior attendibilità sulla natura e sullo stato termico della struttura profonda della caldera. D'altra parte, le perforazioni effettuate nel passato, oltre ad essere state finalizzate a scopi diversi da quello vulcanologico e con tecnologie oggi obsolete, non hanno interessato il settore centrale e quello

orientale, ma i settori occidentali (zona Mofete) e settentrionale (zona San Vito) della caldera.

Il *Campi Flegrei Deep Drilling Project* (CFDDP) è stato concepito per indagare i settori orientale e centrale della caldera, la cui conoscenza è di estrema rilevanza per gli studi di pericolosità vulcanica e per la gestione dell'altissimo rischio ad essa associato, specialmente nel settore orientale che contiene buona parte della città di Napoli. Il Progetto, nato nel 2005 nell'ambito delle attività dell'*International Continental Drilling Program*, consorzio internazionale per la promozione delle perforazioni profonde a scopo scientifico, è stato varato nel 2009 dopo 4 anni di progettazione e valutazione internazionale.

La prima fase del progetto, consistente nella realizzazione di un pozzo di 500 metri principalmente per scopi stratigrafici e per l'installazione di sensori di monitoraggio, era stata programmata per ottobre 2010, ma l'inizio è stato ritardato di quasi due anni a causa di una campagna di stampa, che descriveva il progetto come foriero di possibili effetti catastrofici sull'ambiente e sulla popolazione. Tra i possibili "incidenti" ipotizzati, quelli che hanno maggiormente colpito la fantasia della popolazione, ampiamente descritti da alcuni quotidiani e da altri canali mediatici, sono stati l'eruzione vulcanica ed i terremoti. Mentre è abbastanza semplice convincersi che una perforazione non può causare un'eruzione, anche nel caso estremamente raro, ma realmente avvenuto (<http://www.geothermal.is/deep-drilling-case-study/deep-drilling-project-iddp>), che si raggiunga una zona di accumulo magmatico, l'idea che una perforazione possa causare terremoti può sembrare maggiormente fondata. Alcuni incidenti accaduti in tempi recenti sono stati spesso semplicisticamente attribuiti ai processi di perforazione, mentre in realtà tali rischi sono esclu-

sivamente imputabili all'utilizzo che si fa della perforazione stessa "dopo" la sua realizzazione.

In effetti, un rischio di sismicità indotta è generalmente associabile ad attività che comportino l'iniezione o l'estrazione di fluidi da serbatoi crostali, specialmente in aree caratterizzate da alti sforzi tettonici, ossia da notevole sismicità naturale. I meccanismi precisi della sismicità indotta non sono completamente chiari. Il loro meccanismo generale può essere descritto come conseguenza delle perturbazioni dello stato di sforzo del sottosuolo, provocate dall'iniezione/estrazione di fluidi. In pratica, quando si iniettano o si estraggono grandi quantità di fluidi per tempi lunghi negli strati rocciosi, si alterano gli equilibri di sforzo in profondità, e quindi si può favorire lo scorrimento di faglie già caricate di sforzo tettonico o, in alcuni casi, creare ex-novo fratture sismogenetiche. Questo effetto è molto più marcato nel caso di iniezione di fluidi, ad alte pressioni, che non durante l'estrazione dei fluidi da un serbatoio, in quanto l'aumento di pressione ha un carattere maggiormente destabilizzante rispetto ad una situazione di equilibrio dello stato di sforzo. Inoltre, l'effetto sismogenetico è maggiore quanto più lungo è il tempo di iniezione/estrazione, ossia quanto maggiori sono i volumi di fluido iniettati/estratti ed i volumi di roccia coinvolti, e quindi maggiore è la perturbazione allo stato di sforzo ed il volume di roccia perturbato. Con queste premesse, non è ipotizzabile che una semplice perforazione, senza iniezione o estrazione di fluido, possa generare o anche favorire terremoti, in quanto non causa variazioni dello stato di sforzo in profondità.

Un pozzo potrebbe intercettare, durante la perforazione, una sacca di liquido o di gas; questo è l'incidente universalmente più temuto in una perforazione. Tutti gli impianti di perforazione moderni

sono infatti specificamente equipaggiati per affrontare questo rischio, mediante vari livelli di dispositivi per la chiusura ermetica veloce del pozzo, chiamati *blow-out preventer* (ossia “inibitori di eruzione”, in quanto la fuoriuscita di fluidi in pressione da un pozzo è detta tecnicamente “eruzione del pozzo”). La fuoriuscita di fluidi in pressione, nel caso in cui questi siano gas nocivi come anidride carbonica o idrogeno solforato, costituisce il maggior pericolo di una perforazione, che però si limita generalmente all’area del cantiere in quanto le concentrazioni di gas diminuiscono rapidamente con la distanza dal punto di emissione, raggiungendo livelli inferiori a quelli di minimo rischio entro poche decine di metri di distanza. Un’ipotetica “eruzione” di fluidi dal pozzo non può generare terremoti propriamente detti, ma soltanto, nei casi più gravi, un leggero tremore legato al degassamento superficiale.

L’incidente più noto, al quale fa riferimento la campagna di stampa contro il CFDDP, è quello legato al terremoto che avvenne a Basilea nel dicembre del 2006, durante le operazioni che dovevano portare alla creazione di una centrale elettrica basata sulla geotermia stimolata (EGS – *Enhanced Geothermal Systems*) al centro della città di Basilea. Questi tipi di impianti geotermici utilizzano strati rocciosi profondi ad alta temperatura che, data la scarsa permeabilità, non contengono naturalmente l’acqua necessaria alla produzione dell’energia. L’acqua viene iniettata dalla superficie terrestre nelle rocce calde e poi prelevata, dopo che si è riscaldata, per alimentare gli impianti. Per creare un serbatoio permeabile in cui l’acqua immessa dalla superficie possa circolare riscaldandosi, bisogna aumentare artificialmente la permeabilità delle rocce calde, cosa che si ottiene iniettando acqua con pressione tale da fratturarle (il processo viene tecnicamente chiamato *fracking*). Per

generare un *fracking* diffuso si iniettano nelle rocce calde flussi di acqua tali da generare alte pressioni (fino a diverse decine di MPa) che producono, negli strati scarsamente permeabili, una rete di piccole fratture, che formandosi generano piccoli terremoti. L’iniezione di acqua per la creazione del serbatoio permeabile dura in genere decine di giorni o anche qualche mese. A Basilea, un pozzo di cinque chilometri di profondità, la stessa a cui si trovava lo strato ad alta temperatura, era stato perforato per questo scopo. Ovviamente, tale operazione non causò di per sé nessun problema. Invece, dopo diverse settimane di “stimolazione” idraulica, consistente nella iniezione di circa 50-100 litri di acqua al secondo, con pressioni a fondo pozzo di 40-60 MPa, cominciarono a verificarsi diverse migliaia di microterremoti (in gran parte di Magnitudo minore di 2), fino ad un terremoto di Magnitudo 3,4, che pur non producendo danni rilevanti, fu chiaramente avvertito dalla popolazione. Questo evento, chiaramente provocato da attività umane (l’ipocentro del terremoto era sotto il pozzo), creò grande sconcerto nella popolazione e nell’opinione pubblica internazionale. Il terremoto era stato provocato dall’iniezione continua di grandi volumi di acqua, con alti flussi e la creazione di corrispondenti sovrappressioni, e non certamente dalle operazioni di perforazione del pozzo.

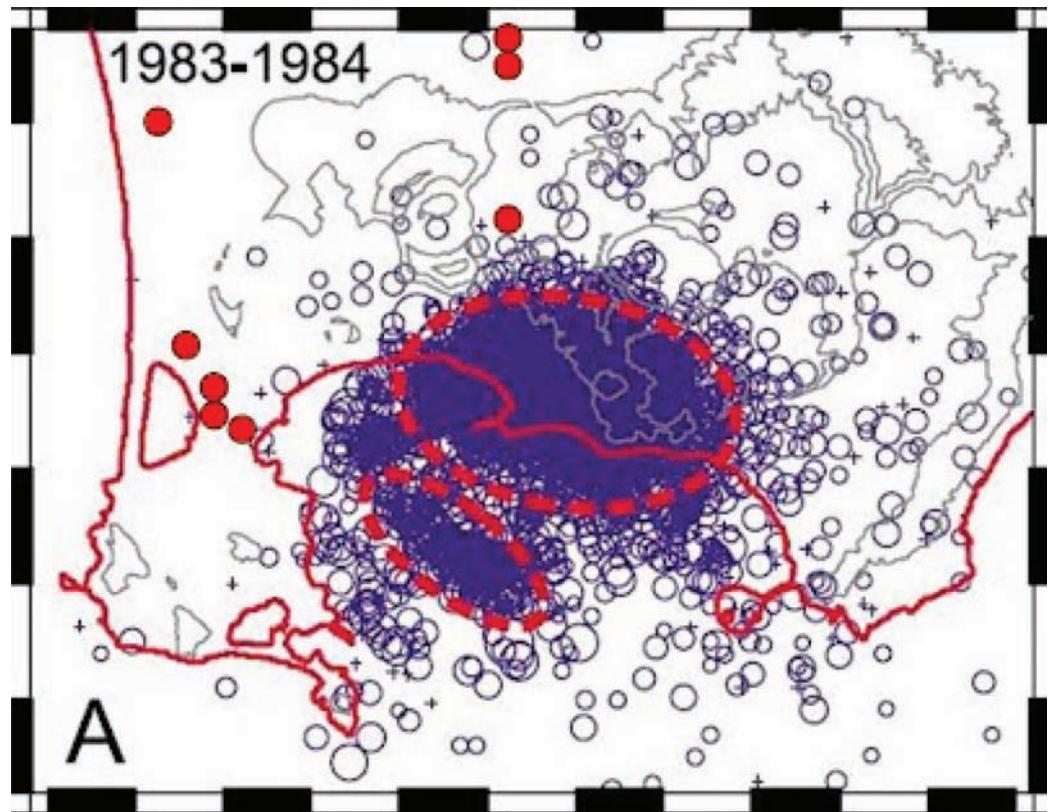
Una osservazione interessante sul possibile rapporto tra perforazioni profonde e sismicità viene proprio dalle perforazioni a scopo geotermico effettuate fino al 1985 nell’area flegrea da ENEL ed AGIP. Queste perforazioni furono effettuate durante il noto fenomeno di bradisismo del 1982-1985, che portò tra l’altro all’evacuazione di una parte della cittadina di Pozzuoli, trasferita nella *new town* di Montereuciello. In quegli anni le reti sismiche dell’Osservatorio Vesuviano registrarono circa 15.000

terremoti, con Magnitudo fino a 4,2 (De Natale e Zollo, 1986). In Figura 1 è riportata la mappa dell'area flegrea con le localizzazioni di molti dei terremoti accaduti in quel periodo (D'Auria et al., 2011); i cerchi rossi rappresentano i pozzi dell'epoca, localizzati nelle aree Mofete e San Vito. È importante sottolineare che in quei pozzi, oltre alla semplice perforazione e carotaggio di alcuni settori, venivano effettuati anche diversi esperimenti, quali "prove di emungimento" consistenti in prelievi continuativi di grandi quantità di fluidi per diversi giorni, nonché "stimolazioni idrauliche", consistenti nell'iniezione di acqua ad alta pressione per rendere i pozzi produttivi (ossia stimolare la fuoriuscita spontanea di fluidi geotermici). Nonostante tutto, tutta la sismicità era concentrata in aree assolutamente diverse da quelle di perforazione. Ciò avveniva perché i terremoti erano natu-

ralmente prodotti dal fenomeno bradisimico (in numero approssimativamente proporzionale ai tassi di sollevamento) e le perforazioni erano localizzate sui bordi calderici, dove i tassi deformativi erano molto bassi. D'altra parte, questa coincidenza fortuita della non sovrapposizione tra i siti di perforazione e le aree soggette a forti tassi deformativi dimostra, nel modo più evidente possibile, che, nonostante il periodo particolare e l'alta sismicità dell'area, le operazioni di perforazione, ancorché accompagnate da discontinui prelievi/reiniezioni di fluidi, non hanno avuto il minimo effetto sismogenetico.

Resta da sottolineare un ultimo punto. Sebbene in linea di principio l'estrazione di fluidi geotermici per tempi lunghi ed in grandi quantità possa favorire la sismicità, l'area geotermica più antica del mondo, quella di Larderello in Toscana, in cento anni di sfruttamento geotermi-

Figura 1.
Localizzazione dei terremoti ai Campi Flegrei registrati nel periodo 1983-1984, di massimo bradisismo. I cerchietti vuoti, con raggio proporzionale alla Magnitudo, rappresentano le localizzazioni di circa 15000 terremoti registrati all'epoca. I cerchietti rossi rappresentano le localizzazioni dei pozzi profondi ENEL-AGIP effettuati nello stesso periodo. Si noti che, malgrado l'enorme sismicità delle aree intorno a Pozzuoli, le zone dove si perforarono i pozzi (fino a 3050 metri di profondità) risultavano assolutamente prive di sismicità. (figura da D'Auria et al., Journ. Geophys. Res., 2011).



co non ha mai presentato problemi di sismicità anomala. Altre aree geotermiche simili, come quella di *The Geysers* localizzata nel parco di Yellowstone (USA), hanno avuto occasionalmente terremoti probabilmente indotti dall'estrazione geotermica prolungata, fino a Magnitudo maggiori di 4. Entrambe queste aree sono caratterizzate da prelievo di grandi quantità di fluido (sono quelle con le maggiori potenze elettriche installate al mondo), senza re-iniezione in falda di quantità significative del fluido prelevato. Nell'ambito di un progetto FP7 della Comunità Europea, il cui acronimo è appunto *Geiser*, il principale contributo di AMRA è stato la elaborazione di una procedura probabilistica di valutazione della variazione della pericolosità sismica durante i prelievi di fluido, che possa servire da guida ad una conduzione delle operazioni in condizioni di sicurezza. In realtà, poiché l'instabilità di sforzo potenzialmente sismogenetica è legata al prelievo di grandi volumi di fluido, per tempi lunghi, impianti geotermici che prevedano la re-iniezione totale del fluido estratto, nella stessa falda di provenienza, potrebbero eliminare il problema di possibile sismicità indotta. Ciò avviene se i pozzi di re-iniezione sono scelti in modo tale da assicurarsi che i tassi di re-iniezione di fluido siano velocemente assorbiti dai pozzi, senza generare sovrappressioni significative. In tal modo, dopo un breve transiente iniziale, il serbatoio geotermico produttivo non è alterato nella quantità di fluido contenuto (il bilancio totale tra estrazione e re-iniezione è nullo) ed è quindi nulla la variazione di sforzo prodotta. Per concludere, anche l'impiego

geotermico con re-iniezione totale dei fluidi, purché effettuata in pozzi di sufficiente permeabilità, non comporta nel sottosuolo variazioni di sforzo a regime, e non è quindi sismogenetico. Ciò è tanto più vero quanto più superficiale è la profondità dei pozzi, in quanto gli strati più superficiali sono di per sé meno sismogenetici.

Bibliografia

- AGIP, 1987. Geologia e geofisica del sistema geotermico dei Campi Flegrei, Technical report. Settore Esplor e RicGeoterm-Metodol per l'Esplor Geotermica, San Donato Milanese Italy, 1-23.
- Carlino S., Somma R., Troise C., De Natale G. (2012) Geothermal exploration of Campanian volcanoes: historical review and future development. *Renew. & Sustain. Energy Rev.* 16, 1, 1004-1030.
- Convertito V., Maerclin N., Sharma N., Zollo A. (2012). From Induced seismicity to Direct Time Dependent Risk Assessment. *Bull.Seism. Soc. America*, 102: 2563-2573 doi: 10.1785/01.20120036.
- D'Auria L., Giudicepietro F., Aquino I., Borriello G., Del Gaudio C., Lo Bascio D., Martini M., Ricciardi G.P., Ricciolino P., Ricco C. (2011) Repeated fluid-transfer episodes as a mechanism for the recent dynamics of Campi Flegrei caldera (1989–2010). *J. Geophys. Res.*, 116, B04313.
- De Natale G., Troise C., Sacchi M. (2007) The Campi Flegrei Deep Drilling Project, Scientific Drilling, 4, doi:10.2204/iodp.sd.4.15.2007.
- De Natale G., Zollo, A., (1986) Statistical analysis and clustering features of the Phlegraean Fields earthquake sequence, May '83-May '84. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76, 801-814.
- Troiano A., Di Giuseppe M.G., Troise C., Tramelli A., De Natale G. (2013) A Coulomb stress model for induced seismicity distribution due to fluid injection and withdrawal in deep boreholes. *Geophys. Journ. Int.*, in corso di stampa.
- Giardini D. (2009) Geothermal quake risks must be faced, *Nature*, 462, 848-849.

Il paradiso e l'inferno

Pietro Greco

C'era una grotta profonda e immensa per la sua vasta apertura, rocciosa, protetta da un nero lago e dalle tenebre dei boschi, sulla quale nessun volatile impunemente poteva dirigere il proprio volo con le ali, tali erano le esalazioni che, effondendosi dalla nera apertura, si levavano alla volta del cielo.

Eneide, VI-238

Lo avevano capito, gli antichi. Il paradiso dei Campi Flegrei spalanca direttamente sull'inferno. Ed è da una di quelle finestre, sul Lago d'Averno, che Enea obbedendo agli ordini della Sibilla, scende finalmente nel Tartaro.

Ma lo hanno capito anche i moderni. Quelle medesime finestre consentono di passare dagli infocati abissi (dell'ignoranza) ai dolci cieli (della conoscenza). Non ci sono forse, tra le prime domande scientifiche ascoltate in terra europea, mille e cinquecento anni dopo la morte di Archimede, quelle che Federico II di Hohenstaufen, lo *stupor mundi*, pone a Pietro Ansolino da Eboli, medico, poeta e *magister*, autore di un libro, il *De balneis Puteolanis* in cui descrive le 35 diverse acque minerali del circondario di Pozzuoli: spiegami com'è possibile che in un solo luogo, Puteoli, esistano tante acque e di natura così diversa, dolci e salate, calde, bituminose e fredde? Da dove giungono e perché? Com'è possibile che non superino mai il livello di travaso?

E Charles Lyell non pone forse a frontespizio dei suoi *Principles of Geology*, da molti considerata l'opera che inaugura la moderna scienza geologica, proprio l'immagine del *Macellum*, «carefully reduced from that given by the Canonico Andrea De Jorio in his *Ricerche sul Tempio di Serapide, in Pozzuoli*, Napoli, 1820»?

Virgilio e gli antichi invitano, ancora oggi, ad acquisire la consapevolezza che i Campi Flegrei sono un luogo davvero unico. Uno dei pochi «super vulcani» conosciuti. L'unico che da millenni sottende un territorio ad alta densità demografica. L'unico con cui l'uomo cerca di convivere da centinaia di secoli. Federico, Lyell e i moderni indicano la necessità e, insieme, la possibilità – uniche a loro volta – che offrono i Campi Flegrei di conoscere il mostro e di imparare a viverci insieme.

E questo ci hanno detto gli esperti nelle pagine precedenti: dobbiamo avere consapevolezza dei pericoli vulcanici – ancora una volta unici, anche se diversificati – associati ai Campi Flegrei. E dobbiamo continuare a interrogarli, quei campi ardenti, per sapere da loro sempre di più.

L'unicità del luogo ci espone a due diversi rischi: o meglio, a due diverse modulazioni del rischio, o volendo essere precisi della pericolosità. La prima è quella a breve termine. Ed è espressa dalla domanda: cosa sta succedendo nei Campi Flegrei, *hic et nunc*: qui e ora? A questa domanda cerchiamo di rispon-

dere. Anche se in termini di scenario, (vedi articoli precedenti) e in termini probabilistici. Qualcosa sta succedendo: e infatti la Protezione Civile, in accordo con la Commissione Grandi Rischi, ha elevato di un gradino (al livello di attenzione) il livello di base del Piano di Emergenza. Calma, dunque. Anche se una calma vigile.

La seconda modulazione è quella del medio-lungo periodo. Cosa succederà nei prossimi anni, nei prossimi decenni, o nelle prossime centinaia di anni nei Campi Flegrei? Speriamo di no. Ma le conoscenze che abbiamo sembrano piuttosto univoche: prima o poi probabilmente si verificheranno nuovi fenomeni di bradisismo – come ci ammonisce il *Macellum* così ben riprodotto dal canonico De Jorio nelle *Ricerche sul Tempio di Serapide, in Pozzuoli*, e attentamente riprodotto da Charles Lyell nel frontespizio del libro fondativo della geologia moderna. E non è da escludere un'eruzione vulcanica, più o meno potente. Questa analisi contiene in sé il progetto per la riduzione del rischio. Creare le infrastrutture capaci di reggere alle sollecitazioni dei movimenti della terra, siano essi bradismi o terremoti veri e propri. Creare le infrastrutture per la rapida e ordinata evacuazione della zona in caso di minaccia vulcanica. E creare una cultura del rischio che è l'elemento primario della prevenzione. Ormai su tutto il pianeta, non solo nei Campi Flegrei, viviamo, come dice il sociologo Ulrich Beck, nella «società del rischio». Non tanto perché siamo sottoposti a maggiori pericoli che in passato. Ma perché abbiamo una maggiore «percezione del rischio». La percezione del rischio si fonda su varie componenti, anche contraddittorie: ce n'è una analitica, ma ce n'è un'altra mitica. C'è n'è una fondata sulla conoscenza scientifica dei dati di fatto e un'altra sulla mera sensazione di pericolo. Non è il caso, in questo contesto, di indagare la psi-

cologia che sottende alla percezione del rischio.

Vale la pena, però, rilevare come sulla percezione del rischio incida in maniera significativa la conoscenza. Quella analitica. Quella scientifica. In fondo viviamo nella «società del rischio» anche perché abbiamo, grazie alla scienza, una «coscienza enorme» del rischio. E questa «coscienza enorme» – un insieme di attenzione vigile, di informazione e di domanda di partecipazione – è emersa soprattutto grazie allo sviluppo delle conoscenze scientifiche.

La percezione del rischio gioca un ruolo decisivo nei comportamenti di noi, cittadini comuni. Anche nei comportamenti che consentono di prevenire il rischio. Una matura percezione fa dunque tutt'uno con una matura cultura del rischio. Ovvero con un'attenzione vigile ai fattori di rischio, una corretta informazione, una giusta tensione a compartecipare alle scelte di prevenzione e di gestione del rischio.

Una cultura del rischio diffusa e matura si ottiene attraverso un processo che, per l'appunto, mantiene vigile l'attenzione attraverso la partecipazione informata della popolazione. E richiede un gioco articolato tra comunità scientifica, istituzioni politiche, sistema di comunicazione di massa e cittadini.

La comunità scientifica deve prendere atto che oggi è parte del proprio dovere professionale informare e dialogare con il pubblico dei non esperti. Perché i cittadini hanno diritto a informazioni scientifiche fondate.

Le istituzioni politiche hanno il dovere di creare i «luoghi» dove i diritti di cittadinanza scientifica – essere informati in maniera trasparente e compartecipare alle scelte – possano essere esercitati.

Tra questi «luoghi della cittadinanza scientifica» ci sono la scuola e il sistema dei media, nodi cruciali nella rete della creazione e della diffusione di una cultura del rischio.

Come tradurre questo insieme di principi astratti in azioni concrete per sviluppare una «cultura del rischio sismico e vulcanico» nei Campi Flegrei? In tre modi, essenzialmente. Abbiamo una comunità scientifica che ha prodotto una conoscenza preziosa su questi rischi e che – lo dimostra, tra l'altro, questa rivista – è disponibile a informare e a dialogare in piena trasparenza con il pubblico (con i pubblici) dei non esperti. Occorre ora che questa opera di informazione e di dialogo trasparente assuma caratteri di sistematicità e capillarità. Insomma, che l'informazione e la disponibilità al dialogo raggiungano tutti i cittadini che abitano nei Campi Flegrei.

Per questo è importante che le istituzioni politiche regionali e locali se ne facciano carico. Che assumano come una priorità informare sul «rischio Campi Flegrei» e coinvolgere i cittadini nelle scelte, oltre che attivare tutte le altre opere di prevenzione.

Ma è molto importante anche l'azione della scuola e dei mezzi, vecchi e nuovi, di comunicazione di massa. È solo attraverso la formazione (a scuola) e l'informazione sistematica (attraverso i media) che possiamo creare una «coscienza enorme», ma critica ed equilibrata, del rischio sismico e vulcanico nei Campi Flegrei.

Quanto alle agorà dove i cittadini possono partecipare alle scelte di prevenzione, ce n'è già una disponibile: è la Città della Scienza, a Bagnoli. Le fiamme ne hanno distrutto di recente le strutture, ma non l'idea o la funzione. Ecco un bel modo per riavviare la ricostruzione: fare di quel Museo scientifico il luogo per allenare scientificamente la cittadinanza nei Campi Flegrei.

Per creare una «coscienza enorme», critica, ma vigile e informata, sul rischio sismico e vulcanico.

Iniziando, per esempio a rispondere a domande come queste: ha senso inte-

grare la modulazione della pericolosità che ha una scala dei tempi di decine-centinaia di anni con quella che invece ha una scala dei tempi di giorni o settimane? E se sì, in che modo? In questo caso non ci aiuta la storia. Perché è vero che le eruzioni vulcaniche si sono verificate mentre l'uomo già abitava i Campi Flegrei. Ma in epoche in cui quei nostri progenitori non avevano cognizione che quel paradiso spalanca direttamente sull'inferno. Oggi noi abbiamo una conoscenza scientifica del fenomeno. Ma questa «conoscenza» ci offre qualche concreta possibilità di agire? E non ci aiuta neppure il fatto di sapere che, in giro per il mondo, di «super vulcani» ce n'è almeno una dozzina. Nessuno di loro insiste in un territorio così altamente popolato. Dunque ci troviamo in una condizione unica. E in una condizione singolare ogni scelta è difficile, anche da un punto di vista scientifico. Anche da un punto di vista filosofico. Non ci resta, almeno per ora, che acquisire consapevolezza della condizione di sostanziale unicità. E integrare al meglio le due modulazioni del rischio: quelle a breve e a medio periodo.

Dopo le pagine che abbiamo letto sappiamo due cose. La prima è che la conoscenza, se ben adoperata, aiuta a ridurre il rischio. Sulla base della conoscenza scientifica e del suo buon uso, infatti, la crisi degli anni '80 è stata gestita molto meglio che negli anni '70. Causando meno vittime e meno disagi.

Ma non dobbiamo dare per scontato che, ormai, questo rischio abbiamo imparato a gestirlo. La consapevolezza va riconquistata ogni giorno. Perché, come ci ricorda Ugo Leone, quando in questo nostro paradiso che spalanca direttamente sull'inferno spesso la prima ad andare perduta è la memoria.

Considerazioni conclusive

Franco Gabrielli

Da molti anni si è continuato a costruire senza un preciso disegno di governo del territorio che tenesse conto della specificità data dai Campi Flegrei; ignorando di avere la responsabilità dell'incolmunità di centinaia di migliaia di persone quotidianamente residenti all'interno di una caldera, senza fornire loro le opportune conoscenze sui rischi effettivamente esistenti. Oggi solo operatori formati e preparati saranno in grado di confrontarsi con autorevolezza con i propri concittadini e da loro potrà partire quella spontanea e sana "contaminazione" informativa che sarà fondamentale nel momento in cui l'intero Servizio Nazionale di Protezione Civile sarà chiamato a fronteggiare un'eventuale emergenza.

Le immagini, si sa, riescono a comunicare più di qualsiasi discorso. Dopo aver letto i contributi scientifici editi appositamente per questo prezioso volume, l'intervento dell'assessore Edoardo Cosenza e il racconto del giornalista Franco Mancusi, vorrei partire proprio dalle fotografie aeree dei Campi Flegrei, scattate negli ultimi decenni e che non dubito siano impresse nella mente di molti. Sfogliandole, una dopo l'altra ordinate cronologicamente, ciò che cattura l'attenzione è l'evidenza dell'incessante antropizzazione compiuta nel corso del tempo, sotto governi di diversi colori politici, all'interno di uno del vulcani ancora attivi in Italia. Negli anni, si è continuato a costruire senza un preciso disegno di governo del territorio che tenesse conto della specificità data dai Campi Flegrei; inoltre – e forse questa è un'eredità ancora più pesante da affrontare oggi – per troppo tempo le istituzioni hanno gestito questi insediamenti abitativi ignorando (o fingendo di non sapere) di avere la responsabilità dell'incolmunità di centinaia di migliaia di persone quotidianamente residenti all'interno di una caldera, senza fornire loro le opportune conoscenze sui rischi effettivamente esistenti. E il deficit di consapevolezza e di percezione del rischio che registriamo oggi è, anche, il risultato di una mancata attività di prevenzione basata sulla diffusione di una corretta cultura di protezione civile

che, se vuol dirsi matura, deve partire dalla capacità dei singoli di proteggere se stessi.

Se non ci fermiamo a riflettere su questo, temo che come Servizio Nazionale di Protezione Civile, di cui la componente scientifica è un pezzo imprescindibile, faremo davvero poca strada. La memoria storica, gli sviluppi e i progressi delle ricerche – conquiste anche frutto del confronto tra posizioni scientifiche differenti, a volte addirittura opposte – sono un tesoro immenso: senza non sarebbe possibile pianificare alcunché. E qui si giunge a un altro nodo centrale: ogni piano di protezione civile – anche i cosiddetti "nazionali", come quello per il rischio da eruzione vulcanica dei Campi Flegrei o del Vesuvio – è efficace solo se sale dal basso, ovvero se parte dal territorio. Al Dipartimento della Protezione Civile spetta soprattutto la definizione di una strategia operativa nazionale e il coordinamento di tutte le componenti e le strutture operative del Servizio Nazionale che sarebbero coinvolte in una gestione emergenziale di tale portata. Da Roma, però, è inverosimile conoscere all'unità il numero degli abitanti dei singoli Comuni che sarebbero coinvolti nell'eventualità di una eruzione, il dettaglio di quanti nuclei familiari dovrebbero essere evacuati, come sono composti e dove vivono; è impossibile anche sapere quanti sono, chi sono e dove si trovano i soggetti fragili che necessiterebbero, in caso di

evacuazione preventiva, di un supporto medico. Tutte queste informazioni, e molte altre, basilari per un percorso di pianificazione che sia calato sulle singole realtà e che necessita di costanti aggiornamenti, devono arrivare principalmente dai Comuni, supportati da Provincia, Prefettura e Regione. Sono le amministrazioni locali che, vivendo quotidianamente il territorio e testandone con mano le criticità ordinarie in materia, per esempio, di viabilità o di sicurezza degli edifici strategici, devono farsi attivi protagonisti nella definizione del processo di pianificazione di dettaglio all'interno del quale rientra prepotentemente l'informazione alla popolazione: solo la consapevolezza del rischio e la conoscenza dei corretti comportamenti da mettere in pratica per mitigare gli eventuali effetti disastrosi di una possibile eruzione vulcanica possono salvaguardare la vita dei cittadini. È il concetto di autoprotezione e resilienza delle comunità, alla base del moderno sistema di protezione civile.

Negli anni, infatti, e con il susseguirsi delle calamità, abbiamo imparato che le amministrazioni, ai diversi livelli, pur mettendo in campo ogni sforzo e professionalità possibile, poco riescono a fare se non sono supportate e accompagnate dai propri cittadini; e per essere seguite, devono dimostrare di essere credibili e conquistarsi la fiducia della gente.

Oggi sempre di più, in un contesto caratterizzato dalla incessante produzione e circolazione di notizie più o meno verificate, credo davvero che l'attendibilità

delle istituzioni sia strettamente legata a una seria politica di costante formazione e informazione, basata anche sulla condivisione di tutti i dati disponibili, filtrati e validati dai soggetti competenti. So che stiamo parlando di argomenti caratterizzati da grande incertezza e difficili da comprendere per la gente comune, ma lo sforzo che dobbiamo fare è prenderci il tempo per spiegarli. Auspico che sulla formazione si possano continuare a dedicare le poche risorse che saranno a disposizione nel prossimo futuro; negli ultimi mesi, in raccordo con la Regione Campania e con l'Osservatorio Vesuviano dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, il Dipartimento ha investito parecchio su questo tema, come ha anticipato l'assessore Cosenza: non è stato facile organizzare corsi di formazione durati ciascuno quattro giorni per i tecnici dei Comuni dell'area vesuviana, di quella flegrea e di Napoli, per i volontari di protezione civile delle organizzazioni presenti sul territorio e per il personale delle strutture operative locali. Serve grande impegno da parte di tutti, ma questa è la strada che dobbiamo percorrere. Solo operatori del sistema formati e preparati saranno in grado di confrontarsi con autorevolezza con i propri concittadini e da loro potrà partire quella spontanea e sana "contaminazione" informativa che sarà fondamentale nel momento in cui l'intero Servizio Nazionale di Protezione Civile sarà chiamato a fronteggiare un'eventuale emergenza.

AMRA
Notiziario
AMRA

Progetti e attività di AMRA

In questa rubrica informiamo sulle principali iniziative e progetti in corso da parte di AMRA Scarl nelle sue collaborazioni internazionali

a cura di

Umberto Arena, Annamaria Criscuolo

AMRA e Fater

Amra e la Fater lavorano assieme per un progetto finalizzato ad Attività di sviluppo sperimentale per la valutazione della fattibilità tecnica del processo di gassificazione a letto fluido per il recupero di energia da prodotti assorbenti per l'igiene intima post-consumo Lo scopo dell'attività sperimentale è ottenere un insieme affidabile di dati per valutare la fattibilità tecnica ed economica e l'impatto ambientale del processo di gassificazione a letto fluido di residui del processo del riciclo di prodotti assorbenti per l'igiene post-consumo (detti residui AHP) e fornire informazioni utili per la progettazione di processo e quella esecutiva di un impianto.

La parte principale delle attività di ricerca sarà costituita da indagini sperimentali, sia esercendo il gassificatore a letto fluido bollente di scala pilota che quello di scala pre-pilota che AMRA ha a disposizione, che consentiranno, con le necessarie analisi chimico-fisiche, l'acquisizione di dati utili alla valutazione di fattibilità tecnica di un impianto di scala commerciale in grado di processare i residui di assorbenti per l'igiene intima post-consumo prodotti dal processo di igienizzazione con vapore ad alta pressione tramite autoclave che Fater sta sviluppando. Il principale combustibile di interesse per la sperimentazione è la frazione cellulosa dei residui AHP come ottenuta dal processo di riciclo degli assorbenti per l'igiene intima post-consumo. Il programma sperimentale include anche alcune prove di co-gassificazione, utilizzando come co-combustibile la frazione plastica che è pure recuperata dai residui AHP dal processo di riciclo, ed è essenzialmente costituita da una miscela di polietilene e polipropilene.

Progetto Soroche – Servizi di consulenza per la protezione del sistema idrico Tomebamba-Machangara della città di Cuenca in Ecuador

Il progetto Soroche ha, come obiettivo principale, la risoluzione del problema della contaminazione da manganese del sistema idrico Tomebamba-Machángara che serve la città di Cuenca in Ecuador.

Il progetto, finanziato in buona parte dall'IDB (Banco interamericano di Desarrollo), rientra nell'ambito della seconda fase del *Plan Maestro de Agua Potable y Saneamiento de la ciudad de Cuenca* e può considerarsi, per molti aspetti, come la prosecuzione delle attività svolte nel progetto CUENCA (*Piano di gestione dei rischi per i sistemi idrico e fognario della città di Cuenca – Ecuador*), e come un

consolidamento del rapporto già instaurato con ETAPA, l'azienda municipale per le telecomunicazioni e per il servizio idrico e fognario della Città di Cuenca , che è la principale beneficiaria del progetto.

Una significativa contaminazione da manganese delle acque di approvvigionamento idrico ha avuto inizio nel 2001, a seguito di una frana che ha interessato il bacino del torrente Soroche intorbidendo le acque in ingresso all'impianto di potabilizzazione del Tixan dal quale si approvvigiona, all'incirca, il 50% della città di Cuenca. Le indagini effettuate hanno rilevato la presenza di diossido di Manganese proveniente dalla frana di Soroche. La contaminazione delle acque, ha creato e crea tutt'ora problemi non solo alla rete idrica e all'impianto di potabilizzazione ma anche alla centrale idroelettrica di Saucay gestita dalla società Elecaustro. Proprio per ovviare all'improvviso aumento della torbidità nell'acqua in ingresso alla centrale , Elecaustro nel 2003 ha costruito un “by-pass” in grado di deviare l'acqua carica di sedimenti solidi e ridurne al minimo la miscelazione con l'acqua pulita e turbinata in uscita dalla centrale.

Il funzionamento sporadico del bypass, però, non è in grado di garantire che la contaminazione delle acque in arrivo all'impianto del Tixan si mantenga inferiore ai livelli massimi di manganese (100 ug/l) previsti dalla legislazione.

La presenza di manganese nel sistema idrico ha causato anche la formazione di una pellicola sulla parete interna dei tubi che favorisce lo sviluppo di microrganismi nocivi alla salute. Per effetto di tali incrostazioni che causano il trasporto in sospensione del manganese ETAPA riceve numerosi reclami da parte dell'utenza per “Acqua Nera”.

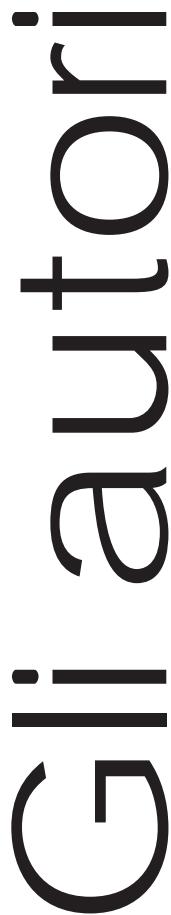
Oltre alla frana principale, il cui conoide alluvionale ha una superficie di circa 25 ettari, sono state riscontrate nuove frane, che hanno messo in evidenza le caratteristiche dinamiche del processo, e la necessità di ulteriori indagini al fine di stabilire opportune misure di stabilizzazione ed evitare un aumento del deterioramento della qualità delle acque fluviali.

Per affrontare questo quadro complesso è necessario un approccio fortemente integrato e multidisciplinare che consenta, sia di caratterizzare la frana e di definire opportuni interventi di mitigazione, sia di affrontare il problema dell'ottimizzazione del funzionamento del by-pass e dell'impianto di potabilizzazione di Tixan. In questo contesto si inquadrano le attività che verranno svolte da Amra e che riguarderanno:

- lo studio geologico, geofisico e geotecnico dell'area in frana;
- la pianificazione e progettazione di interventi strutturali per la mitigazione frana;
- l'individuazione di misure opportune per ridurre alla fonte la concentrazione di manganese attraverso l'ottimizzazione di operazioni di by-pass;
- l'ottimizzazione del funzionamento dell'impianto di potabilizzazione di Tixan;
- l'individuazione della soluzione ottimale per la pulizia delle tubazioni della rete idrica che dalle incrostazioni dovute alla presenza di manganese.

Quest'ultima attività verrà svolta in collaborazione con la Rotech di Naz-Sciaves (BZ) , una delle maggiori ditte europee specializzate nel lavaggio meccanico delle tubature.

I risultati del progetto consentiranno ad Etapa di controllare le sorgenti idrogeologiche del fenomeno e di migliorare il funzionamento e la gestione sia del by-pass che dell'impianto di potabilizzazione del Tixan, in modo da evitare che il manganese arrivi alla rete di distribuzione. Verrà infine individuata la metodologia più adeguata per la pulizia delle tubazioni dalle incrostazioni presenti.

**Ilenia Arienzo**

Ricercatore presso l'Osservatorio Vesuviano – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Paolo Capuano

Professore di Geofisica dell'Università degli Studi di Salerno.

Lucia Civetta

Professore di Geochemica dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.

Edoardo Cosenza

Assessore alla Protezione Civile, Regione Campania.

Massimo D'Antonio

Professore di Geochemica dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.

Giuseppe De Natale

Dirigente di Ricerca dell'Osservatorio Vesuviano – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Franco Gabrielli

Prefetto, Capo del Dipartimento della Protezione Civile.

Paolo Gasparini

Professore Emerito dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Amministratore delegato e Direttore scientifico di AMRA S.c. a r.l.

Lisetta Giacomelli

Vulcanologo.

Pietro Greco

Giornalista scientifico e scrittore, è direttore della rivista *Scienza & società* e condirettore del web journal *Scienzainrete*.

Ugo Leone

Già docente di Politica dell'Ambiente all'Università degli Studi di Napoli Federico II, è Presidente del Parco Nazionale del Vesuvio.

Giuseppe Luongo

Professore Emerito di Fisica del Vulcanismo dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.

Franco Mancusi

Giornalista.

Marcello Martini

Direttore dell'Osservatorio Vesuviano.

Warner Marzocchi

Sismologo, Dirigente di ricerca dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Roberto Moretti

Professore di Geochemica della Seconda Università degli Studi di Napoli.

Giovanni Orsi

Professore di Vulcanologia dell'Osservatorio Vesuviano – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Paolo Papale

Vulcanologo, Dirigente di ricerca dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Laura Sandri

Ricercatore presso l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna.

Roberto Scandone

Professore di Vulcanologia dell'Università di Roma Tre, Roma.

Jacopo Selva

Ricercatore presso l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna.

Aldo Zollo

Professore di Sismologia dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli.